فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۵، شماره ۱، پاییز ۱۴۰۲، ص. ۳۲۲۹-۳۲۰۳

مقاله علمی-پژوهشی

توسعه روش بازیابی محلی جهت مدیریت اختلال برنامه پهلوگاه

علی امیدوارپناه احمدآبادی، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

عبدالرضا شیخ‌الاسلامی کندلوس (مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: Sheikh@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۷ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۳

چکیده

مسائل برنامه‌ریزی پهلوگاه از جمله مسائل مرتبط با مدیریت بندر هستند که پاسخ این مسائل می‌تواند بر روی هزینه‌های بندر تأثیرگذار باشد و به همین دلیل در مقالات و مطالعات بسیار زیادی مورد بررسی قرار گرفتند. برنامه‌ریزی پهلوگاه شامل دو زیر مسئله تخصیص پهلوگاه و تخصیص جرثقیل اسکله می‌شود. این مقاله قصد دارد این دو زیر مسئله را ادغام کرده و آن‌ها را در قالب یک مدل ریاضی مدل‌سازی کند. حل این مدل ادغامی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان انجام می‌شود که منجر به یک برنامه بهینه پهلوگاه می‌گردد که هزینه‌های بندر را کاهش می‌دهد. برنامه اولیه پهلوگاه با این فرض برنامه‌ریزی می‌شود که تمام داده‌های ورودی مسئله دارای قطعیت هستند؛ اما در واقعیت این‌گونه نیست. در حین اجرای برنامه اولیه ممکن است اتفاقات پیش‌بینی نشده‌ای رخ دهند که اجرای برنامه اولیه را با چالش مواجه کند. این دسته از اتفاقات که عموماً غیرقابل پیش‌بینی هستند را اختلال می‌گویند. به فرایند بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه به‌گونه‌ای که کم‌ترین هزینه و جریمه را برای بندر پی داشته باشد، مدیریت اختلال می‌گویند. تاکنون دو روش کلی برای بازیابی و مدیریت اختلال برنامه پهلوگاه معرفی شدند؛ روش بازیابی سراسری و روش بازیابی محلی. این مقاله با اصلاح ضعف‌های روش بازیابی محلی و توسعه آن، یک روش بازیابی محلی معرفی می‌کند. جهت اعتبارسنجی روش‌های حل مدل‌های ریاضی از داده‌های ورود و خروج کشتی‌ها در هر دو پایانه کانتینری بندر شهید رجایی استفاده می‌شود. نتایج عددی این مقاله نشان می‌دهد روش‌های بازیابی محلی، عملکرد به‌مراتب بهتری نسبت به روش بازیابی سراسری دارند (پاسخ بهینه در روش‌های محلی در پایانه اول حدود ۱۲۰ در صد و در پایانه دوم حدود ۳۰۰ در صد بهتر از پا سخ نهایی روش بازیابی سرا سری است). دو روش بازیابی محلی و روش بازیابی محلی توسعه‌یافته پاسخ‌های تقریباً مشابهی دارند اما سرعت رسیدن به پاسخ نهایی در روش بازیابی محلی توسعه‌یافته تقریباً ۲ الی ۳ برابر بیشتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی پهلوگاه، مدیریت اختلال، بازیابی سراسری، بازیابی محلی، بازیابی محلی توسعه‌یافته

۱. مقدمه

در طی سالیان اخیر دو پدیده کانتینری شدن حمل‌ونقل کالا و جهانی شدن اقتصاد، اهمیت حمل‌ونقل دریایی را بیشتر از گذشته کرده است. نقش پررنگ حمل‌ونقل دریایی در جابجایی کالا، این روش حمل‌ونقلی را به حلقه مهمی از زنجیره تأمین جهانی تبدیل کرده و این مهم باعث ایجاد رقابت تنگاتنگ بندرها کانتینری گردیده است. با توجه به هزینه بالای ایجاد زیرساخت‌های بندر و تهیه جرثقیل‌های اسکله، پایانه‌های کانتینری با استفاده بهینه و کارآمد از منابعی مانند نیروی انسانی، پهلوگاه، جرثقیل اسکله و تجهیزات مختلف، هزینه‌های عملیاتی خود را کاهش می‌دهند تا در این فضای رقابتی موفق باشند.

پایانه‌های کانتینری دارای پنج ناحیه اصلی هستند: پهلوگاه، اسکله، محوطه جابجایی کانتینرها، محوطه انبار و دروازه. دو ناحیه از پنج ناحیه گفته‌شده را به‌عنوان جانب دریا می‌شناسند؛ پهلوگاه و اسکله. دو ناحیه محوطه کانتینری و دروازه پایانه را به‌عنوان جانب خشکی در نظر می‌گیرند. ناحیه محوطه جابجایی کانتینرها، در تقاطع بین ناحیه جانب دریا و ناحیه جانب خشکی قرار دارد. این مقاله بر روی عملیاتی تمرکز دارد که در ناحیه جانب دریا انجام می‌شوند.

عملیات جانب دریا شامل ۳ مسئله می‌شود؛ مسئله تخصیص پهلوگاه (BAP)[۱]، مسئله تخصیص جرثقیل اسکله (QCAP)[۲] و مسئله برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله (QCSP)[۳].

- در مسئله تخصیص پهلوگاه به دنبال تعیین دو پارامتر زمان و مکان پهلوگیری کشتی‌ها هستند.
- در مسئله تخصیص جرثقیل اسکله تعداد جرثقیل‌های اسکله‌ای که در هر بازه زمانی بر روی کشتی‌ها فعالیت می‌کنند را محاسبه می‌کنند.
- در مسئله برنامه‌ریزی جرثقیل اسکله، مشخص می‌شود که در هر بازه زمانی کدام جرثقیل‌ها بر روی کدام کشتی‌ها فعالیت کنند و کدام کانتینرها را تخلیه/بارگیری کنند.

دو مسئله BAP و QCAP را اصطلاحاً برنامه‌ریزی پهلوگاه می‌نامند. تمرکز این مقاله بر روی همین دو مسئله است.

مسائل عملیات جانب دریا کاملاً به‌هم‌پیوسته هستند؛ به این معنی که حل مسئله QCAP تأثیر زیادی بر روی مدت‌زمان تخلیه/بارگیری می‌گذارد (هرچه تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده بیشتر باشد، عملیات تخلیه/بارگیری کشتی‌ها سریع‌تر انجام می‌شود) و مدت‌زمان تخلیه/بارگیری بر روی مسئله BAP تأثیر می‌گذارد. به همین دلیل در سالیان اخیر رویکرد جدیدی برای مدل‌سازی مسائل عملیات جانب دریا توسط پژوهشگران پیشنهادشده که این مسائل را به‌صورت ادغامی و در قالب یک مدل، مدل‌سازی می‌کنند. به این نوع مدل‌ها، اصطلاحاً مدل ادغامی[۴] گفته می‌شود. در مدل‌سازی ادغامی، هر دو مسئله در قالب یک مدل، مدل‌سازی و حل می‌شوند؛ یعنی توابع هدف این دو مسئله با یکدیگر جمع شده و محدودیت‌های این دو مسئله در یک مدل مشترک تجمیع می‌شوند. رویکرد دیگری که برای مدل‌سازی مسائل به‌هم‌پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد، رویکرد مدل‌سازی سلسله مراتبی است؛ یعنی دو مسئله BAP و QCAP به‌صورت جداگانه و به ترتیب مدل‌سازی و حل شوند. پژوهش‌های گذشته، نشان دادند که مدل‌سازی ادغامی اثر متقابل دو مسئله را بر روی یکدیگر در نظر می‌گیرد و درنتیجه به پاسخ‌های بهتری منتج می‌شود.

برنامه‌ریزی پهلوگاه در یک محیط دارای عدم قطعیت انجام می‌شود. مقاله (Lee and Song 2017) عدم قطعیت‌ها را به دو نوع کلی تقسیم می‌کند: عدم قطعیت‌های باقاعده[۵] و اختلال[۶]. آن دسته از وقایع و فعالیت‌های احتمالی که دائماً تکرار می‌شوند و قابل پیش‌بینی هستند را عدم قطعیت‌های باقاعده می‌داند. این دسته از عدم قطعیت‌ها را می‌توان در زمان برنامه‌ریزی و پیش از اجرا در نظر گرفت. آن دسته از وقایعی غالباً غیرقابل‌پیش‌بینی هستند و معمولاً به‌ندرت رخ می‌دهند، را اختلال می‌نامد. با توجه به نرخ وقوع این دسته از اتفاقات، نمی‌توان آن‌ها را پیش‌بینی کرد و در زمان برنامه‌ریزی آن‌ها را در نظر گرفت. این اختلال‌ها

معمولاً در حین اجرای برنامه رخ می‌دهند و موجب انحراف از برنامه اولیه می‌شوند؛ برخی اوقات مقدار این انحراف به حدی زیاد است که اجرای برنامه اولیه را غیرممکن می‌کند. در این مواقع نیاز است تا برنامه اولیه مورد بازبینی و بازیابی قرار گیرد تا قابل اجرا باشد. بازیابی برنامه‌های اولیه پس از رخ دادن اختلال‌ها به‌گونه‌ای که کم‌ترین هزینه را به بندر تحمیل کند را اصطلاحاً مدیریت اختلال[۷] می‌گویند.

تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با مدیریت اختلال در حوزه‌های مختلف برنامه‌ریزی انجام‌گرفته است؛ اما در رابطه با برنامه‌ریزی بندر مقالات بسیار اندکی به بررسی پدیده اختلال و مدیریت اختلال برنامه اولیه پرداختند که در قسمت دوم همین مقاله به آن‌ها پرداخته می‌شود. این مقاله قصد دارد تا خلأ تحقیقاتی گفته‌شده را پر کند و یک روش جدید برای مدیریت اختلال برنامه اولیه پهلوگاه در شرایط وقوع اختلال معرفی کند. تا پیش‌ازاین، دو روش کلی برای مدیریت اختلال برنامه اولیه پهلوگاه معرفی‌شده است؛ روش بازیابی سراسری[۸] و بازیابی محلی[۹]. در روش بازیابی سراسری، همه کشتی‌هایی که زمان پهلوگیری‌شان پس از وقوع اختلال است، با استفاده از مدل مدیریت اختلال مجدداً برنامه‌ریزی می‌شوند؛ اما در روش بازیابی محلی، فقط کشتی‌هایی برنامه‌ریزی می‌شوند که پدیده اختلال، به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم، بر روی آن‌ها تأثیر گذاشته باشد. در مقاله حاضر ضعف‌های روش بازیابی محلی پوشش داده‌شده و یک روش جدید توسعه داده می‌شود.

در ادامه مقاله حاضر، پژوهش‌های انجام‌گرفته در حوزه برنامه-ریزی عملیات جانب دریا و بازیابی آن‌ها در شرایط وقوع اختلال مرور می‌شوند. در بخش سوم مقاله، دو مسئله تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله به‌صورت ادغامی مدل‌سازی ریاضی می‌شوند. مدل ادغامی مدیریت اختلال برنامه پهلوگاه، نیز در همین بخش مدل‌سازی می‌شود. در بخش چهارم مقاله روش‌های مدیریت اختلال توضیح داده می‌شوند و روش بازیابی محلی توسعه‌یافته معرفی می‌شود. در بخش پنجم با استفاده از داده‌های ورود و خروج کشتی‌ها در بندر شهید رجایی، به برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه و مدیریت اختلال آن در شرایط وقوع اختلال پرداخته می‌شود. در بخش انتهایی، نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش به‌صورت خلاصه جمع‌بندی می‌شوند.

۲. پیشینه پژوهش

تاکنون سه مقاله مدل‌های برنامه‌ریزی پهلوگاه را دسته‌بندی و معرفی کردند. برای اولین بار در سال ۲۰۱۰ و در مقاله (Bierwirth and Meisel 2010) مدل‌های برنامه‌ریزی پهلوگاه دسته‌بندی شدند. در مقاله مذکور دسته‌بندی مدل‌های برنامه‌ریزی پهلوگاه با کمک ٤ معیار انجام گردید؛ معیار نوع پهلوگاه، معیار زمان، معیار زمان تخلیه/بارگیری و معیار تابع هدف.

- نوع پهلوگاه می‌تواند گسسته، پیوسته و یا ترکیبی باشد. در پهلوگاه گسسته، طول اسکله به پهلوگاه‌های مجزایی تقسیم می‌شود که در هرکدام از این پهلوگاه‌ها تنها یک کشتی می‌تواند پهلوگیری کند. در پهلوگاه‌های پیوسته، کشتی‌ها می توانند در هر نقطه از امتداد اسکله پهلوگیری کنند. در پهلوگاه‌های ترکیبی، اسکله به تعدادی پهلوگاه مجزا و گسسته تقسیم می‌شود، اما کشتی‌ها را می‌توان به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی کرد که بیش از یک پهلوگاه را اشغال کنند. در مقاله (Carlo, Vis et al. 2015) دسته دیگری از مدل‌های برنامه‌ریزی پهلوگاه را معرفی شد که پهلوگاه‌ها را به‌صورت تورفته مدل-سازی کردند.
- زمان ورود کشتی‌ها به سه صورت در نظر گرفته شدند؛ ایستا، پویا و موعد مقرر. اگر کشی‌ها در یک‌زمان ثابت وارد بندر شوند، زمان ورودشان ایستا محسوب می‌شود و اگر در زمان‌های مختلف وارد بندر شوند از نوع پویا محسوب می-شوند. برخی از مدل‌ها برای کشتی‌ها موعدی مقرری در نظر گرفتند که کشتی‌ها تمایل دارند در آن موعد مقرر کانتینرهایشان در بندر تخلیه/بارگیری شود. این دسته از مدل‌ها

در دسته مدل‌های موعد مقرر دسته‌بندی می‌شوند. در مقاله مروری (Bierwirth and Meisel 2015) دو نوع دیگر از مدل‌ها معرفی شدند؛ دوره‌ای و تصادفی. در مدل‌هایی که زمان ورود کشتی‌ها به‌صورت دوره‌ای در نظر می‌گیرند، فرض بر این است که کشتی‌ها به‌صورت دوره‌ای (مثلاً هر هفته) و در زمان ثابتی وارد بندر می‌شوند. در مقابل مدل‌هایی هم هستند که عدم قطعیت‌های باقاعده در زمان ورود کشتی را در نظر می‌گیرند، که این مدل‌ها در دسته مدل‌های تصادفی قرار می‌گیرند.

- زمان تخلیه/بارگیری کانتینرهای کشتی‌ها به دو صورت کلی در نظر گرفته می‌شود؛ ثابت، وابسته. زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها می‌تواند وابسته به تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده در هر بازه زمانی، محل پهلوگیری، تعداد کانتینرهای کشتی و ... وابسته باشد. عمدتاً مقالاتی در این دسته قرار می‌گیرند که دو مسئله BAP و QCAP را در قالب یک مدل ادغامی مدل‌سازی کردند. در برخی از مقالات دیگر مسئله BAP به‌صورت جداگانه مدل‌سازی و حل شده و زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها را ثابت فرض کردند. در مقاله (Bierwirth and Meisel 2015) نوع دیگری از مدل‌ها هم دسته‌بندی شدند که عدم قطعیت زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها را در نظر می‌گیرند.
- برنامه‌ریزی پهلوگاه معمولاً با استفاده از مدل‌های ریاضی انجام می‌شود که در آن‌ها معمولاً به دنبال کمینه یا بیشینه کردن مقدارهای عددی هستند. تابع هدف مدل‌های ریاضی نشان می‌دهد که با تغییر متغیرهای مسئله، برنامه تا چه اندازه به سمت بهینگی حرکت می‌کند. در برنامه‌ریزی پهلوگاه معمولاً به دنبال کمینه کردن زمان انتظار کشتی‌ها، کمینه کردن زمان تخلیه/بارگیری، کمینه کردن تأخیر در اعزام کشتی‌ها، کمینه کردن هزینه‌های عملیاتی بندر به‌وسیله استفاده بهینه از منابع بندر (جرثقیل، وسایل نقلیه، فضای پهلوگاه و نیروی انسانی)، کمینه کردن هزینه حمل کانتینرهای کشتی در بندر با کمک انتخاب مکان بهینه پهلوگیری و ... هستند.

در ادامه این بخش مقالاتی که تمرکزشان بر روی برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه و بازیابی آن در شرایط وقوع اختلال است، مرور اجمالی خواهند شد.

در مقاله (Zhou and Kang 2008) دو مسئله BAP و QCAP به‌صورت ادغامی و با تصادفی در نظر گرفتن زمان ورود کشتی‌ها مدل‌سازی شدند. مدل ژو و کانگ با هدف کمینه‌سازی مجموع زمان انتظار کشتی‌ها در پایانه کانتینری مدل‌سازی شد. آن‌ها برای حل مدلشان از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک استفاده کردند.

در مقاله (Lu and Xi 2010) دو مسئله BAP و QCAP به‌صورت غیرخطی و استوار و به‌صورت یک مدل ادغامی مدل‌سازی شدند. لو و خی یک شبیه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک انجام دادند تا محل پهلوگیری کشتی و تعداد جرثقیل تخصیص داده به کشتی را به‌صورت هم‌زمان به دست آورند. در مقاله آن‌ها به جرثقیل‌ها اجازه داده شد که پیش از اتمام عملیات تخلیه/بارگیری کشتی‌ها، مجدداً به کشتی دیگری تخصیص پیدا کنند. آن‌ها عدم قطعیت دو پارامتر زمان ورود کشتی و زمان تخلیه/بارگیری را در مدلشان در نظر گرفتند.

در مقاله (Li, Tong et al. 2009) بازیابی تخصیص پهلوگاه در حالتی که زمان ورود کشتی‌ها تأخیر داشته باشد مدل‌سازی شده است. لی و همکارانش یک مدل برای مدیریت اختلال تخصیص پهلوگاه پیشنهاد دادند که هزینه بازیابی را کاهش می‌دهد. آن‌ها برای حل مدلشان از الگوریتم ژنتیک خود تطبیقی و روش بازیابی سراسری استفاده کردند. تابع هدف مدل پیشنهادی آن‌ها، کمینه‌سازی هزینه ناشی از عدم پهلوگیری در مکان مناسب و هزینه ناشی از تأخیر در اعزام کشتی‌ها بوده است.

در مقاله (Zhen, Lee et al. 2011) مسئله BAP با در نظر گرفتن عدم قطعیت دو پارامتر زمان ورود و زمان تخلیه/بارگیری، مدل‌سازی شد. ژن و همکارانش عدم قطعیت پارامترها را با

استفاده از مدل‌سازی دومرحله‌ای مسئله، در نظر گرفتند؛ در مرحله اول برنامه اولیه تخصیص پهلوگاه مدل‌سازی و حل شد و در مرحله دوم یک مدل ریاضی بازیابی برنامه اولیه تخصیص پهلوگاه مدل‌سازی شد. تابع هدف مدل پیشنهادی آن‌ها، کمینه-سازی هزینه‌های ناشی از انحراف برنامه جدید از برنامه اولیه بود. آن‌ها برای حل مدلشان از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید و روش بازیابی سراسری استفاده کردند.

در مقاله (Zeng, Yang et al. 2011) سه مسئله BAP، QCAP و QCSP مدل‌سازی حل شدند. مدل‌سازی برنامه اولیه عملیات جانب دریا در دو مرحله انجام گرفت؛ در مرحله اول یک مدل ادغامی برای دو مسئله BAP و QCAP، و در مرحله دوم مسئله QCSP مدل‌سازی شد. روش بازیابی محلی عملیات جانب دریا برای اولین بار در این مقاله مورد استفاده قرار گرفت. زِنگ و همکارانش دو استراتژی برای بازیابی برنامه اولیه تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله پیشنهاد دادند؛ بازیابی برنامه جرثقیل‌های اسکله و بازیابی برنامه تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله. برای هرکدام از استراتژی‌های پیشنهادشده یک مدل مجزا پیشنهاد دادند و هرکدام از مدل‌ها را با روش بازیابی محلی و سراسری حل کردند. نتایج این مقاله نشان داد که روش بازیابی محلی، در زمان کمتری به پاسخ می‌رسد اما روش بازیابی سراسری، نتایج بهتری را گزارش می‌دهد.

در مقاله (Rodriguez-Molins, Salido et al. 2014) یک رویکرد استوار برای دو مسئله BAP و QCAP پیشنهاد شد. مولینز و همکارانش، با در نظر گرفتن زمان حائل بین تخلیه/بارگیری کشتی‌ها به دنبال افزایش استواری برنامه اولیه بودند. آن‌ها با هدف کمینه‌سازی زمان کل تخلیه/بارگیری کشتی ها، بیشینه‌سازی زمان حائل بین کشتی‌ها و کمینه‌سازی انحراف معیار زمان حائل مدلشان را مدل‌سازی کردند.

در مقاله (Li, Jin et al. 2015) بهینه‌سازی و بازیابی بلادرنگ مدل ادغامی BAP و QCAP در شرایط اختلال مورد بررسی قرار گرفتند. در مدل لی و همکارانش به جرثقیل‌های اسکله اجازه داده شد که پیش از اتمام عملیات تخلیه/بارگیری کشتی ها، به سمت دیگر کشتی‌ها حرکت کرده و بر روی کشتی‌های جدید کار کنند. در مدل بازیابی آن‌ها اولویت کشتی‌ها برای سریع‌تر اعزام شدن نیز در نظر گرفته‌شده است. در مدل پیشنهادی آن‌ها کیفیت خدمات بیشینه و هزینه ناشی از بازیابی کمینه می‌شود.

در مقاله (Zhang, Zeng et al. 2016) یک روش بهینه‌سازی لکسیکوگرافی برای بازیابی برنامه‌های پهلوگاه در پایانه‌های کانتینری پیشنهاد شد. ژانگ و همکارانش یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه را مدل‌سازی کردند که سطوح مختلف رضایت را برای کلیه ذی‌نفعان در نظر می‌گیرد. تابع هدف مدل مدیریت اختلال پیشنهادی آن‌ها، کمینه‌سازی جریمه ناشی از پهلوگیری کشتی‌ها در مکانی غیر از مکان پهلوگیری در برنامه اولیه بود. آن‌ها کشتی ها را بر اساس معیارهایی نظیر نوع شرکت کشتی‌رانی، حساسیت به تأخیر در اعزام کشتی‌های، میزان اهمیت برای متصدی بندر و مقدار جریمه ناشی از تأخیر، به سه گروه تقسیم کردند. در ادامه، مدلشان را در سه مرحله حل کردند و در هر مرحله بازیابی برنامه پهلوگیری یک گروه از کشتی‌ها(کشتی‌های کلیدی، کشتی‌های خط‌پیما و کشتی‌های فیدر) را انجام دادند. آن‌ها مدلشان را در دو حالت مدل‌سازی کردند؛ مدل تک هدفه و مدل چندهدفه. تجزیه‌وتحلیل عددی صورت گرفته توسط آن‌ها نشان داد مدل چندهدفه، نتایج بهتری را به ارمغان می‌آورد.

در مقاله (Liu, Zheng et al. 2016) اختلال ناشی از خرابی جرثقیل‌های اسکله در میانه اجرای برنامه، بررسی شد. لئو و همکارانش با هدف از کمینه‌سازی اثرات منفی اختلال به وجود آمده، برنامه اولیه را برنامه‌ریزی مجدد کردند. آن‌ها ابتدا به مدل‌سازی سه مسئله عملیات جانب دریا پرداختند و در ادامه اختلال ناشی از خرابی جرثقیل اسکله را مورد بررسی قرار دادند. ازآنجاکه سیاست برنامه‌ریزی مجدد در دنیای واقعی شامل سود برنامه‌ریزان بندر، صاحبان کشتی و متصدی جرثقیل اسکله می‌شود، مقاله آن‌ها درک رفتاری این افراد را در فرایند

برنامه‌ریزی مجدد و اجرای آن، در نظر گرفته است. برای در نظر گرفتن درک رفتاری این افراد، از نظریه دورنما (یکی از مشهورترین نظریات اقتصاد رفتاری) در برنامه‌ریزی مجدد پهلوگاه استفاده‌شده است. دو رویکرد متفاوت افراد برای برنامه‌ریزی مجدد در مقاله مذکور مقایسه شده است؛ رویکرد برنامه‌ریزی مجدد در سریع‌ترین زمان ممکن و رویکرد برنامه‌ریزی مجدد در دیرترین زمان ممکن. در رویکرد اول به‌محض شروع اختلال، فرایند برنامه‌ریزی مجدد نیز انجام می‌شود اما در رویکرد دوم، پس از اتمام اختلال، برنامه‌ریزی مجدد انجام می‌گردد. نتایج مقاله آن‌ها نشان داد رویکرد اول به نتایج بهتری ختم می‌شود.

در مقاله (Xiang, Liu et al. 2018) تخصیص هم‌زمان پهلوگاه گسسته و جرثقیل اسکله در محیط دارای عدم قطعیت بررسی شد. چهار نوع اختلال توسط خیانگ و همکارانش در نظر گرفته شد؛ انحراف در زمان ورود کشتی، خرابی جرثقیل‌های اسکله، انحراف در زمان تخلیه/بارگیری کشتی و ورود کشتی برنامه‌ریزی نشده به بندر برای پهلوگیری. مقاله آن‌ها دو استراتژی واکنشی و پیش‌کنشی را مقایسه می‌کند. استراتژی واکنشی، برنامه‌ریزی اولیه با فرض قطعی بودن داده‌ها انجام می‌دهد و در صورت وقوع اختلال، برنامه اولیه را بازیابی می‌کند؛ استراتژی پیش‌کنشی برنامه‌ریزی اولیه را با در نظر گرفتن عدم قطعیت داده‌ها انجام می‌دهد. نتایج مقاله مذکور نشان می‌دهد که عملکرد بهتر استراتژی واکنشی را در شرایطی که مقدار عدم قطعیت کم باشد، نشان می‌دهد و در مقابل اگر مقدار عدم قطعیت زیاد باشد، استراتژی پیش‌کنشی به نتایج بهتری ختم می‌شود.

در مقاله (Iris and Lam 2019) یک رویکرد بهینه‌سازی استوار قابل بازیابی برای برنامه هفتگی مدل ادغامی BAP و QCAP توسعه داده شد. ایریس و لام، عدم قطعیت دو پارامتر زمان ورود و مدت‌زمان عملیات تخلیه/بارگیری کشتی‌ها را در نظر گرفتند. در برنامه پایه در نظر گرفته‌شده توسط آن‌ها، زمان و مکان پهلوگیری کشتی‌ها و تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده به کشتی‌ها و هم‌چنین زمان حائل و جرثقیل‌های اسکله‌ای حائل تعیین می‌شود. در مدل پیشنهادی مقاله مذکور، هزینه بازیابی احتمالی مدل نیز در نظر گرفته شده است. هدف آن‌ها از مدل‌سازی ریاضی، کمینه‌سازی هزینه برنامه پایه، هزینه ناشی از بازیابی برنامه و هزینه حل سناریوهای مختلف عدم قطعیت بود. مقاله آن‌ها نشان داد هرچه تعداد کشتی‌های در برنامه‌ریزی بیشتر باشد، پهلوگاه و جرثقیل‌های اسکله با نرخ بالاتری در برنامه پایه به کار گرفته می‌شوند و مقدار زمان و تعداد جرثقیل حائل موردنیاز هم کاهش پیدا می‌کند.

در مقاله (Lv, Jin et al. 2020) بازیابی مسئله تخصیص پهلوگاه در بندرهای ترانسشیپمنت و در محیط اختلال مورد بررسی قرار گرفتند. الوی و همکارانش یک ابزار جدید برای تصمیم‌گیری مسئولان بنادری که با پدیده اختلال دست‌وپنجه نرم می‌کنند، ایجاد کردند. آن‌ها یک مدل ادغامی از نوع برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی برای کمینه کردن هزینه بازیابی برنامه اولیه بندر و برای دو مسئله BAP و QCAP ایجاد کردند. مدل پیشنهادی آن‌ها اتصال بین کشتی‌های بزرگ‌تر و کشتی‌های کوچک‌تر در فرایند ترانسشیپمنت را در نظر می‌گیرد. مدلی که آن‌ها پیشنهاد دادند یک مدل بعدِ اختلال است؛ به این معنی که ابتدا یک اختلال در برنامه اولیه ایجاد می‌شود، سپس با استفاده از مدل پیشنهادی آن‌ها برنامه اولیه بازیابی می‌شود. به عبارت بهتر در مقاله آن‌ها مدلی برای برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه پیشنهاد داده نشده است. تابع هدف مدل آن‌ها کمینه‌سازی هزینه‌های عدم پهلوگیری کشتی در مکان برنامه‌ریزی‌شده اولیه، تأخیر در اعزام کشتی نسبت به برنامه اولیه و جریمه ناشی از تأخیر تراسنشیپمنت کانتینرها بین کشتی‌های بزرگ و کشتی‌های کوچک مرتبط به آن‌ها بوده است.

در مقاله (Schepler, Absi et al. 2019) مسئله BAP به‌صورت گسسته و با در نظر گرفتن تصادفی بودن زمان ورود کشتی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. اسکپلر و همکارانش با هدف کمینه‌سازی زمان حضور کشتی در بندر، کشتی‌ها را برنامه‌ریزی

کردند. سه روش واکنشی، پیش‌کنشی و واکنشی-پیش‌کنشی را برای در نظر گرفتن عدم قطعیت زمان ورود کشتی‌ها در مقاله آن‌ها بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد در حالتی که عدم قطعیت کم باشد، روش واکنشی-پیش‌کنشی به نتایج بهتری منتج می‌شود و اگر میزان عدم قطعیت زیاد باشد، روش واکنشی به نتایج بهتری می‌رسد.

در مقاله (Kim, Park et al. 2021) یک استراتژی برنامه‌ریزی مجدد پیشنهاد شد که هزینه‌های ناشی از اختلال را کمینه می‌کند. کیم و همکارانش، مدلشان را با داده‌های واقعی ورود و خروج کشتی‌ها اعتبارسنجی کردند. نتایج عددی در مقاله آن‌ها نشان می‌دهد که تأخیر کل در روش پیشنهادی آن‌ها کاهش پیدا می‌کند.

در مقاله (Liu, Xiang et al. 2020) مسئله BAP با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمان ورود کشتی‌ها و زمان تخلیه/بارگیری کشتی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. لیو و همکارانش سه مدل دو مرحله‌ای بهینه‌سازی استوار برای BAP مدل‌سازی کردند که بدون نیاز به پارامترهای آماری، سناریوهای احتمالی را شرح می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با کمی افزایش در هزینه‌های برنامه اولیه پهلوگاه، می‌توان مقدار استواری برنامه پهلوگاه را افزایش داد.

در مقاله (Yan, Lu et al. 2019) مدل ریاضی BAP به‌صورت پویا و با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمان ورود کشتی‌ها و انعطاف‌پذیر بودن فضای پهلوگاه مدل‌سازی و حل شد. منظور از انعطاف‌پذیری در مقاله آن‌ها، همان پهلوگاه‌های ترکیبی است که در آن به کشتی‌های بزرگ اجازه داده می‌شود تعدادی از پهلوگاه‌های گسسته را اشغال کنند اما هر پهلوگاه نمی‌تواند به دو کشتی تخصیص پیدا کند. نتایج عددی، مؤثر و استوار بودن پهلوگاه ترکیبی و مؤثر بودن مسئله تخصیص پهلوگاه را نشان داد.

در مقاله (Rodrigues and Agra 2021) سه مسئله عملیات جانب دریا (BAP، QCAP و QCSP) با در نظر گرفتن عدم قطعیت زمان ورود کشتی‌ها مدل‌سازی و حل شدند. رودریگز و آگرا مسئله را در دو مرحله و به‌صورت استوار مدل‌سازی کردند؛ در مرحله اول مسئله BAP با در نظر گرفتن زمان ورود قطعی کشتی‌ها مدل‌سازی شد و دو مسئله QCAP و QCSP با زمان ورود کشتی حل شدند. آن‌ها جرثقیل‌های همگن و غیرهمگن را در نظر گرفتند. نتایج مقاله آن‌ها نشان می‌دهد در حالتی‌که جرثقیل‌ها غیرهمگن باشند، حل مسئله سخت‌تر می‌شود.

همانگونه که مشاهده می‌گردد تعداد اندکی از مقالات، مدیریت اختلال عملیات جانب دریا را بررسی کردند. تا آنجا که می‌دانیم برای اولین بار در مقاله (Zeng, Yang et al. 2011) روش بازیابی محلی برای بازیابی برنامه پهلوگاه در شرایط وقوع اختلال پیشنهاد شد. این مقاله قصد دارد با برطرف کردن ضعف‌های روش بازیابی محلی پیشنهادی در مقاله زِنگ و همکارانش، یک روش بازیابی جدید را توسعه دهد و عملکرد آن را با روش‌های قبلی مقایسه کند.

۳. مدل‌سازی ریاضی برنامه اولیه پهلوگاه

برنامه‌ریزی پهلوگاه شامل دو مسئله می‌شود؛ BAP و QCAP. این مقاله، برای مدل‌سازی این دو مسئله از رویکرد مدل‌سازی ادغامی کمک می‌گیرد؛ چراکه نتایج به‌دست‌آمده از مطالعات پیشین، عملکرد بهتر این رویکرد را نسبت به رویکرد مدل‌سازی سلسله مراتبی نشان می‌دهد. این بخش به مدل‌سازی مسئله تخصیص هم‌زمان پهلوگاه و جرثقیل اسکله (BAQCAP)[۱۰] می‌پردازد.

۳-۱ فرض‌های مسئله

این مقاله، مدل‌سازی مسئله BAQCAP را بر اساس فرض‌های زیر انجام می‌دهد.

۱) هیچ محدودیت فیزیکی و فنی مانند عمق آبخور وجود ندارد.

۲) برای هر کشتی بر اساس محل انبار کانتینرهایش در بندر، بهترین محل پهلوگیری وجود دارد.

۳) پهلوگاه پیوسته است و کشتی‌ها می‌توانند در هر محلی از پهلوگاه پهلوگیری کنند.

٤) تخلیه/بارگیری کشتی‌ها به حداقل تعداد جرثقیل اسکله نیاز دارد و تا زمانی که تعداد جرثقیل‌های اسکله بیکار به تعداد حداقل جرثقیل کشتی نرسد، عملیات تخلیه/بارگیری کشتی شروع نمی‌شود.

۵) داده‌های ورودی برای برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه، قطعی هستند.

٦) جرثقیل‌های اسکله می‌توانند پیش از اتمام عملیات تخلیه/بارگیری کشتی، به کشتی دیگری تخصیص یابند.

۷) تعداد جرثقیل‌های اسکله تخصیص داده‌شده به کشتی، می‌تواند در طول مدت‌زمان تخلیه/بارگیری تغییر کند.

۳-۲ تعریف پارامترها

نمادها و علائمی که در این بخش استفاده می‌شوند به دو دسته تقسیم می‌شوند؛ نمادهای نشان‌دهنده اطلاعات کشتی و نمادهای نشان‌دهنده متغیرهای تصمیم مدل BAQCAP. این دو دسته از نمادها در جدول‌های ۱ و ۲ تعریف می‌شوند.

جدول ۱. خلاصه مقالات مرور شده

مقاله	مسئله			روش حل	استراتژی	
	BAP	QCAP	QCSP		عدم قطعیت	مدیریت اختلال
(Zhou and Kang 2008)	*	*		الگوریتم ژنتیک	*	
(Lu and Xi 2010)	*	*		الگوریتم ژنتیک	*	
(Li, Tong et al. 2009)	*			الگوریتم ژنتیک		*
(Zhen, Lee et al. 2011)	*			الگوریتم شبیه‌سازی تبرید		*
(Zeng, Yang et al. 2011)	*	*	*	الگوریتم جستجوی ممنوعه		*
Rodriguez-Molins, Salido) (et al. 2014	*	*		الگوریتم تکاملی ترکیبی	*	
(Li, Jin et al. 2015)	*	*		الگوریتم ابتکاری		*
(Zhang, Zeng et al. 2016)	*	*		الگوریتم بهینه‌سازی لکسیکوگرافی		*
(Liu, Zheng et al. 2016)	*	*	*	الگوریتم آزادسازی-ثابت سازی		*
(Xiang, Liu et al. 2018)	*	*	*	الگوریتم ابتکاری	*	*
(Iris, Pacino et al. 2017)	*	*		الگوریتم ابتکاری	*	*
(Lv, Jin et al. 2020)	*	*		الگوریتم بهینه‌سازی چرخ صدادار		*
(Absi et al. 2019 ,Schepler)	*			الگوریت جستجوی ممنوعه	*	*
(Kim, Park et al. 2021)	*	*		الگوریتم افق نورد		*
(Liu, Xiang et al. 2020)	*			الگوریتم ابتکاری افق نورد	*	
(Yan, Lu et al. 2019)	*			نرم افزارهای تجاری	*	
(Rodrigues and Agra 2021)	*	*	*	روش حل دقیق	*	
مقاله حاضر	*	*		الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان		*

۳-۳ مدل‌سازی BAQCAP

مدل مسئله BAQCAP که بدنه اصلی آن از مقاله (Zeng, Yang et al. 2011) گرفته شده، دارای یک تابع هدف و ۱۳ محدودیت می‌باشد. تابع هدفی مدل پیشنهادی این مقاله، کمینه کردن هزینه‌های پهلوگیری کشتی‌ها است. هزینه‌های پهلوگیری کشی‌ها شامل ۳ عبارت می‌شود:

۱) هزینه ناشی از پهلوگیری کشتی‌ها در محل غیر بهینه

۲) هزینه تأخیر در اعزام کشتی

جدول ۲. نمادهای معرف متغیر تصمیم در مدل BAQCAP

x_i	محل پهلوگیری ابتدای کشتی i
B_i	محل پهلوگیری انتهای کشتی $(B_i = x_i + l_i +$ فاصله ایمنی$)$
y_i	زمان شروع پهلوگیری کشتی i
e_i	زمان اتمام عملیات تخلیه/بارگیری کشتی i
z_{ij}^x	متغیر باینری. اگر در محور افقی ماتریس مکان–زمان، کشتی i قبل از کشتی j باشد برابر ۱ است، در غیر این صورت برابر ۰ است.
z_{ij}^y	متغیر باینری. اگر در محور عمودی ماتریس مکان–زمان، کشتی i قبل از کشتی j باشد برابر ۱ است، در غیر این صورت برابر ۰ است.
r_{it}	متغیر باینری. اگر حداقل یک جرثقیل اسکله بر روی کشتی i در زمان t کار کند، برابر ۱ است در غیر این صورت برابر ۰ است.
r_{itq}	متغیر باینری. اگر در زمان t بر روی کشتی i به تعداد q جرثقیل اسکله کار کند، برابر ۱ است در غیر این صورت برابر ۰ است.

جدول ۳. نمادهای معرف اطلاعات کشتی

L	طول کل پهلوگاه که به قسمت‌های $\delta = 10$ متری تقسیم می‌شود.
N	تعداد کل کشتی‌ها
Q	تعداد کل جرثقیل‌های موجود در پایانه
T	مدت‌زمان افق برنامه‌ریزی. این پارامتر به قسمت‌های $\varepsilon = 1$ ساعتی تقسیم‌بندی می‌شود.
a_i	زمان تخمین زده‌شده ورود کشتی i
l_i	طول کشتی i که به قسمت‌های $\delta = 10$ متری تقسیم می‌شود.
NC_i	تعداد کانتینرهای کشتی i که باید در بندر تخلیه/بارگیری شوند.
d_i	موعد مقرر اعزام کشتی i از بندر
b_i	بهترین محل پهلوگیری برای کشتی i که بر اساس محلی که قرار است کانتینرهای کشتی در آنجا بارچینی شوند و یا از آن محل بر روی کشتی i بارگیری شوند.
q_i^{min}	حداقل تعداد جرثقیل موردنیاز برای خدمات‌رسانی به کشتی i
q_i^{max}	حداکثر تعداد جرثقیلی که می‌تواند به کشتی i خدمات‌رسانی کند.
C_{1i}	هزینه اضافی حمل بر مبنای فاصله، ناشی از عدم پهلوگیری کشتی در بهترین محل پهلوگیری‌اش $\frac{\text{واحد پول}}{\text{متر}}$
C_{2i}	جریمه ناشی از اعزام شدن کشتی دیرتر از موعد مقرر ($\frac{\text{واحد پول}}{\text{ساعت}}$)
C_3	هزینه عملیات تخلیه/بارگیری کشتی توسط جرثقیل‌های اسکله در هر ساعت
w_i	تعداد جرثقیل–ساعت موردنیاز برای تخلیه/بارگیری کشتی i
M	عدد بزرگ

$$Min \sum_{i}^{N} \left\{ C_{1i}|x_i - b_i| + C_{2i}(e_i - d_i) + C_3 \sum_{t=1}^{T} r_{it} \right\} \qquad (۱)$$

$$\sum_{t\epsilon T} \sum_{q=1}^{Q} q \times r_{itq} = \left\lceil \frac{NC_i}{MPH} \right\rceil, \quad \forall\, i = 1,2,\dots,N \qquad (۲)$$

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{t\epsilon T} q \times r_{itq} \le Q, \quad \forall t \qquad (۳)$$

$$q_i^{min} \le \sum_{q=1}^{Q} q \times r_{itq} \le q_i^{max}, \quad \forall i,t \qquad (٤)$$

$$\sum_{q=1}^{Q} r_{itq} = r_{it}, \quad \forall i,t \qquad (٥)$$

$$\sum_{t\epsilon T} r_{it} = e_i - y_i, \quad \forall i \qquad (٦)$$

$$B_i \le x_j + M\left(1 - Z_{ij}^x\right), \quad \forall i,j = 1,2,\dots,N \quad i \ne j \qquad (٧)$$

$$e_i \le y_j + M\left(1 - Z_{ij}^y\right), \quad \forall i,j = 1,2,\dots,N \quad i \ne j \qquad (٨)$$

$$Z_{ij}^x + Z_{ji}^x + Z_{ij}^y + Z_{ji}^y \ge 1, \quad \forall i,j = 1,2,\dots,N \quad i \ne j \qquad (٩)$$

$$y_i \ge a_i, \forall\, i = 1,2,\dots,N \qquad (١٠)$$

$$B_i \le L, \forall i = 1,\dots,N \qquad (١١)$$

$$e_i \le T, \forall i = 1,\dots,N \qquad (١٢)$$

$$x_i \epsilon \{0,1,2,\dots,L - l_i\}, \quad \forall i \qquad (١٣)$$

$$Z_{ij}^x, Z_{ij}^y, r_{itq}, r_{it} = 1 \text{ or } 0, \quad \forall i,j,t \quad i \ne j \qquad (١٤)$$

روابط شماره ۱ تا ١٤، مدل ریاضی BAQCAP را نشان می‌دهند. مدل BAQCAP شامل دو دسته محدودیت است؛ محدودیت‌های مرتبط با مسئله QCAP (محدودیت (۲) تا (٦)) و محدودیت‌های مرتبط با مسئله BAP (محدودیت (۷) تا (۱۳)).

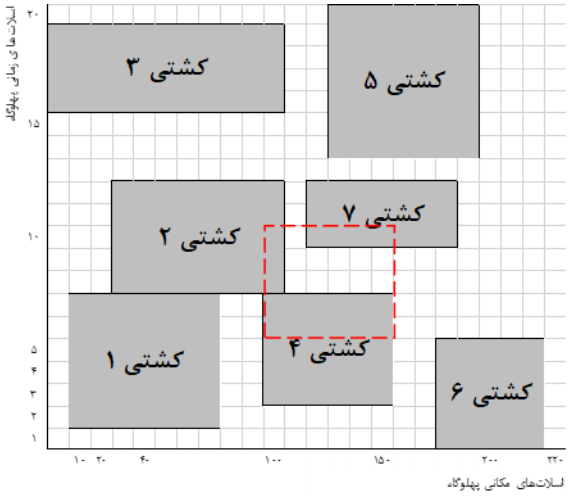
- محاسبه متغیر r_{itq} در محدودیت (۲) انجام می‌شود. در مقاله زِنگ و همکارانش، تعداد جرثقیل–ساعت مورد نیاز کشتی‌ها، بخشی از داده‌های ورودی مسئله در نظر گرفته شده است اما در این مقاله تعداد جرثقیل–ساعت مورد نیاز برای هر کشتی بر اساس تعداد کانتینرهایی که بایستی تخلیه/بارگیری شوند (TEU) محاسبه می‌شود.
- محدودیت (۳)، اطمینان می‌دهد که در هر بازه زمانی، مجموع جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده به کشتی‌ها حداکثر به تعداد جرثقیل‌های موجود در بندر است.
- محدودیت (٤)، تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده به هر کشتی را کنترل می‌کند. هر کشتی حداقل تعداد جرثقیلی را درخواست می‌کند و بر اساس طول کشتی، می‌تواند حداکثر تعداد جرثقیلی را بپذیرد. این محدودیت، کنترل می‌کند که تعداد جرثقیل تخصیص داده‌شده به کشتی از حداقل تعداد جرثقیل کمتر نباشد و از حداکثر تعداد جرثقیل هم بیشتر نباشد.
- محدودیت (٥)، پارامتر r_{it} را محاسبه می‌کند.
- محدودیت (٦)، بیان می‌کند که در تمام بازه زمانی که کشتی در پهلوگاه حضور دارد، باید حداقل یک جرثقیل اسکله عملیات تخلیه/بارگیری آن کشتی را انجام دهد. این محدودیت از نوع محدودیت نرم محسوب می‌شود. به این معنی که اگر این محدودیت رعایت نشود، پاسخ مدل شدنی است اما ترجیح بر این است که این محدودیت رعایت شود. در صورتی از این محدودیت صرف‌نظر می‌شود که پاسخ ناشی از آن، هزینه به‌مراتب کم‌تری را به بندر تحمیل کند.
- محدودیت (۷) و (۸) نحوه محاسبه دو پارامتر Z_{ij}^x, Z_{ij}^y را نشان می‌دهد.
- محدودیت (۹) تداخل کشتی‌ها را بررسی می‌کند. این محدودیت بررسی می‌کند که کشتی‌ها در برنامه پهلوگاه، تداخل زمانی یا مکانی با کشتی‌های دیگر نداشته باشد.
- محدودیت (۱۰) پویا بودن مدل‌سازی را نشان می‌دهد. اگر زمان ورود کشتی‌ها از قبل مشخص نباشد و همه کشتی‌ها در زمان ثابتی وارد بندر شوند، مدل‌سازی از نوع ایستا و در حالتی که زمان ورود کشتی‌ها از قبل مشخص است و زمان شروع پهلوگیری کشتی‌ها پس از زمان ورود آن‌ها باشد، مدل‌سازی مسئله از نوع مدل‌سازی پویا خواهد بود.
- محدودیت (۱۱) اطمینان می‌دهد که محل پهلوگیری کشتی‌ها به‌گونه‌ای محاسبه‌شده است که طول کشتی از طول پهلوگاه بیرون نزند.
- محدودیت (۱۲)، اطمینان می‌دهد که تمام کشتی‌ها تا پیش از افق زمانی موردنظر برنامه‌ریزی‌شده‌اند. این محدودیت از نوع محدودیت نرم محسوب می‌شود و در صورت رعایت نشدن، کماکان برنامه قابل‌اجرا است.

● محدودیت (۱۳) و (۱٤) جنس متغیرها (باینری یا عدد صحیح بودن) را نشان می‌دهند.

۳-٤ مدل‌سازی ریاضی بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه

حل مدل BAQCAP، به یک برنامه اولیه برای پهلوگیری کشتی‌های منتج می‌شود. در مدل BAQCAP فرض شده تمام داده‌ها قطعی هستند و هیچ‌گونه عدم قطعیتی وجود ندارد؛ به این معنی که همه کشتی‌ها دقیقاً در همان زمانی که اعلام کردند وارد بندر می‌شوند، تمام اطلاعاتی که کشتی‌ها گزارش می‌دهند قطعی و بدون تغییر هستند و هیچ‌گونه خرابی یا شرایط پیش‌بینی‌نشده‌ای رخ نمی‌دهد؛ اما در حین اجرای برنامه ممکن است اتفاقاتی رخ دهد که باعث انحراف از برنامه اولیه شود و برنامه اولیه را با اختلال مواجه کند. این اختلال می‌تواند از منابع مختلفی منتج شود؛ به‌عنوان‌مثال تأخیر در رسیدن کشتی به بندر، مشکلات فنی، خرابی ماشین‌آلات در بندر (جرثقیل اسکله)، شرایط بدِ آب‌وهوایی، پدیده جزر و مد دریا و ... . بعد از رخ دادن اختلال و انحراف از برنامه اولیه، نیاز است که برنامه اولیه مورد بازبینی و بازیابی قرار گیرد تا هم هزینه کم‌تری به بندر تحمیل شود و هم برنامه‌های اولیه قابل اجرا باشند.

در شکل ۱ نمایی از یک برنامه اولیه مشاهده می‌شود که دچار اختلال شده است. محور افقی این نمودار، اسلات‌های مکانی و محور عمودی اسلات‌های زمانی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود کشتی شماره ٤ به اندازه چهار اسلات زمانی دیرتر وارد بندر شده و موجب وقوع یک اختلال در برنامه اولیه پهلوگاه گردیده است. این اختلال به وجود آمده، عملیات کشتی-های شماره ۲ و ۷ را نیز مختل کرده و این دو کشتی نیز نمی‌توانند در زمان و مکان برنامه‌ریزی‌شده، پهلوگیری کنند.



شکل ۱. اختلال در برنامه اولیه پهلوگاه

به‌صورت کلی برای بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه دو استراتژی وجود دارد؛ برنامه‌ریزی مجدد و مدیریت اختلال. در روش برنامه‌ریزی مجدد، تمام کشتی‌هایی که از نظر زمانی بعد از کشتی مختل شده پهلوگیری می‌کنند با مدل BAQCAP دوباره برنامه‌ریزی شوند. در روش مدیریت اختلال، برنامه اولیه به‌گونه‌ای بازیابی می‌شود که کمترین تأثیر منفی را از پدیده اختلال بگیرد؛ بنابراین تابع هدف در مدل ریاضی مدیریت اختلال، کمینه کردن هزینه‌های ناشی از اختلاف برنامه بازیابی شده با برنامه اولیه است. برای مدیریت اختلال در برنامه پهلوگاه، باید یک مدل ریاضی مدل‌سازی شود تا با کمک آن برنامه اولیه بازیابی شود. این مدل، مدل بازیابی برنامه اولیه تخصیص پهلوگاه و جرثقیل اسکله (RBAQCAP)[11] نام می‌گیرد.

بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه تحت شرایط اختلال، به‌صورت کلی با ٤ روش انجام می‌گیرد:

● روش انتقال به بالا: همه کشتی‌های باقی‌مانده در برنامه اولیه به‌اندازه زمان اختلال، در محور زمان به جلو انتقال داده شوند. واضح است که روش انتقال به بالا به پاسخ‌های بسیار ضعیفی منتج می‌شود اما ساده‌ترین روش محسوب می‌شود.

● روش بازیابی سراسری (GR)[8]: برنامه عملیات جانب دریا برای همه کشتی‌های باقی‌مانده در برنامه اولیه، بازیابی می شوند.

• روش بازیابی محلی (LR)[9]: برنامه پهلوگاه فقط برای کشتی هایی که از پدیده اختلال متأثر شده‌اند، بازیابی می‌شوند. در مقاله (Zeng, Yang et al. 2011) برای اولین بار از این روش برای بازیابی برنامه پهلوگاه در شرایط وقوع اختلال استفاده شد. این روش در بخش ٤-٢ توضیح داده خواهد شد.

• روش بازیابی محلی توسعه‌یافته (DLR)[12]: مشابه با روش LR، برنامه پهلوگاه فقط برای کشتی‌هایی بازیابی می‌شود که از پدیده اختلال متأثر می‌شوند. در روش بازیابی محلی سه پارامتر برای تنظیم کردن وجود تا برنامه به‌صورت بهینه بازیابی شود. در روش DLR ضعف روش LR برطرف شده و بدون تنظیم هیچ پارامتری برنامه اولیه پهلوگاه را بازیابی می‌کند. روش DLR در بخش ٤-٣ توضیح داده خواهد شد.

٣-٥ فرض‌های مسئله

در این مقاله مدل مدیریت اختلال با این فرض مدل‌سازی می‌شود که در هر بازه زمانی تنها یک کشتی با پدیده اختلال مواجه می‌شود.

٣-٦ تعریف پارامترها

نمادها و علائم استفاده‌شده در مدل مدیریت اختلال در جدول٤ تعریف می‌شوند:

جدول ٤. نمادها و پارامترهای مدل RBAQCAP

t_d	زمانی که پدیده اختلال رخ می‌دهد.
N'	تعداد کشتی‌هایی که عملیات تخلیه/بارگیری‌شان در زمان رخ دادن اختلال، تمام نشده است.
x_i'	مکان پهلوگیری کشتی i در برنامه جدید وقتی‌که اختلال رخ می‌دهد.
y_i'	زمان شروع پهلوگیری کشتی iدر برنامه جدید وقتی‌که اختلال رخ می‌دهد.
e_i'	زمان اتمام عملیات تخلیه/بارگیری کشتی i در برنامه جدید وقتی‌که اختلال رخ می‌دهد.
$z_{ij}^{x'}$	متغیر باینری؛ اگر در برنامه جدید کشتی i ازنظر مکانی قبل از کشتی j پهلوگیری کند برابر ١ است، در غیر این صورت برابر ٠ است.
$z_{ij}^{y'}$	متغیر باینری؛ اگر در برنامه جدید کشتی i ازنظر زمانی قبل از کشتی j پهلوگیری کند برابر ١ است، در غیر این صورت برابر ٠ است.
r_{it}'	متغیر باینری. در برنامه جدید، اگر حداقل یک جرثقیل اسکله بر روی کشتی i در زمان t کار کند، برابر ١ است در غیر این صورت برابر ٠ است.
r_{itq}'	متغیر باینری. در برنامه جدید، اگر در زمان t بر روی کشتی i به تعداد q جرثقیل اسکله کار کند، برابر ١ است در غیر این صورت برابر ٠ است.

٣-٧ مدل‌سازی مدیریت اختلال

مدل مدیریت اختلال تا حدود زیادی مشابه با مدل برنامه‌ریزی اولیه می‌باشد. تابع هدف در مدل مدیریت اختلال، کمینه کردن هزینه بازیابی برنامه اولیه می‌باشد. هزینه‌های بازیابی شامل موارد زیر می‌باشد:

- هزینه ناشی از پهلوگیری در مکان غیر بهینه
- هزینه تأخیر در اعزام کشتی نسبت به برنامه اولیه
- هزینه طولانی‌تر شدن عملیات تخلیه/بارگیری

تفاوت تابع هدف در مدل مدیریت اختلال و مدل برنامه‌ریزی اولیه، در محاسبه دو هزینه تأخیر در اعزام کشتی و هزینه عملیات تخلیه/بارگیری است.

- در مدل برنامه‌ریزی اولیه، تأخیر در اعزام کشتی نسبت به موعد مقرر معرفی‌شده توسط شرکت کشتیرانی محاسبه می‌شود اما در مدل مدیریت اختلال، نسبت به برنامه اولیه محاسبه می‌شود.
- در مدل برنامه‌ریزی اولیه، کل هزینه عملیات تخلیه/بارگیری کشتی محاسبه می‌شود اما در مدل مدیریت اختلال، تنها هزینه مازاد عملیات تخلیه/بارگیری نسبت به برنامه اولیه محاسبه می‌شود.

محدودیت‌های مدل مدیریت اختلال مشابه با محدودیت‌های مدل BAQCAP می‌باشد.

$$Min \sum_{i\in N'}\left\{C_{1i}|x_i'-b_i|+C_{2i}(e_i'-e_i)^+ + C_a\left(\sum_{t=1}^{T} r_{it}' - \sum_{t=1}^{T} r_{it}\right)^+\right\} \quad (۱۵)$$

$$\sum_{t\epsilon T}\sum_{q=1}^{Q} q\times r_{itq}' = \left[\frac{NC_i}{MPH}\right], \quad \forall\, i\in N' \quad (۱۶)$$

$$\sum_{i\in N'}\sum_{q=1}^{Q} q\times r_{itq}' \le Q, \quad \forall\, t\epsilon T \quad (۱۷)$$

$$\sum_{q=1}^{Q} r_{itq}' = r_{it}', \quad \forall\, i\in N' \quad \forall\, t\epsilon T \quad (۱۸)$$

$$\sum_{t\epsilon T} r_{it}' = e_i' - y_i', \quad \forall\, i\in N' \quad (۱۹)$$

$$\sum_{t\epsilon T}\sum_{q=1}^{Q} q\times r_{itq}' \ge w_i, \quad \forall\, i\in N' \quad (۲۰)$$

$$q_i^{min} \le \sum_{q=1}^{Q} q\times r_{itq}' \le q_i^{max}, \quad \forall t\in T, \forall\, i\in N' \quad (۲۱)$$

$$x_i' + l_i \le x_j' + M\left(1-z_{ij}^{x'}\right), \quad \forall\, i,j\in N', \quad i\ne j \quad (۲۲)$$

$$e_i' \le y_j' + M\left(1-z_{ij}^{y'}\right), \quad \forall\, i,j\in N', \quad i\ne j \quad (۲۳)$$

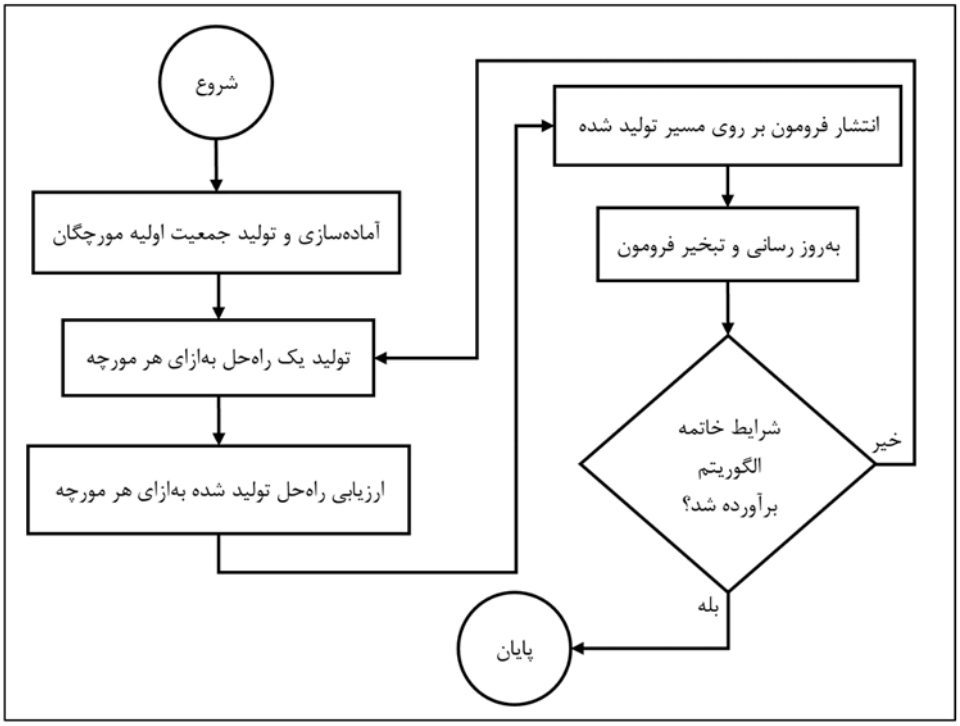
$$z_{ij}^{x'} + z_{ji}^{x'} + z_{ij}^{y'} + z_{ji}^{y'} \ge 1, \quad \forall i,j\in N', \quad i\ne j \quad (۲۴)$$

$$y_i' \ge a_i, \forall\, i\in N' \quad (۲۵)$$

$$x_i' + l_i \le L, \forall\, i\in N' \quad (۲۶)$$

٤. روش حل مدل‌های ریاضی

در این مقاله برای حل مدل‌های ریاضی از الگوریتم فراابتکاری بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO)[۱۳] استفاده می‌شود. هم‌چنین برای بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه و حل مدل RBQCAP از سه روش GR، LR و DLR استفاده می‌شود.



شکل ۲. الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان

٤-١ الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO)

الگوریتم ACO، با الهام از حرکت جمعی مورچگان توسعه‌یافته است. مطالعات نشان می‌دهد مورچه‌ها حشرات اجتماعی‌ای هستند که در کلونی‌ها زندگی می‌کنند و رفتار آن‌ها بیشتر در جهت بقاء کلونی است تا در جهت بقاء یک جزء آن. یکی از مهم‌ترین و جالب‌ترین رفتار مورچه‌ها، رفتار آن‌ها برای یافتن غذا است و به‌ویژه چگونگی پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر میان منابع غذایی و آشیانه. در دنیای واقعی، مورچه‌ها ابتدا به‌طور تصادفی به این‌سو و آن‌سو می‌روند تا غذا بیابند. سپس به لانه برمی‌گردند و ردّی از فرومون به‌جا می‌گذارند. مورچه‌های دیگر وقتی این مسیر را می‌یابند، پرسه زدن را رها کرده و آن را دنبال می‌کنند. سپس اگر به غذا برسند به خانه بازمی‌گردند و رد دیگری از خود در کنار رد قبل برجای می‌گذارند و به عبارتی مسیر قبل را تقویت می‌کنند. لذا وقتی یک مورچه مسیر کوتاهی را از خانه تا غذا بیابد، بقیه مورچه‌ها با احتمال زیادی همان مسیر را دنبال می‌کنند و با تقویت مداوم آن مسیر و تبخیر ردهای دیگر، به‌مرور همه مورچه‌ها هم مسیر می‌شوند. هدف الگوریتم کلونی مورچگان تقلید این رفتار مورچه‌ها است. شکل ۲ نمایی ساده از الگوریتم ACO را نشان می‌دهد.

در مرحله تولید راه‌حل، هر کشتی که احتمال بیشتری برای انتخاب شدن داشته باشد دارای شانس بیشتر هم هست. احتمال انتخاب هر کشتی بر اساس رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود.

$$p_{i\to j}^{k}=\begin{cases}\dfrac{(\tau_{ij})^{\alpha}\times(\eta_{ij})^{\beta}}{\sum_{m\epsilon\mathcal{N}_i^k}(\tau_{im})^{\alpha}\times(\eta_{im})^{\beta}}, & j\epsilon\mathcal{N}_i^k\\ 0, & j\notin\mathcal{N}_i^k\end{cases} \quad (۲۷)$$

در رابطه (۲۷)، پارامتر $p_{i\to j}^{k}$ احتمال انتخاب کشتی jاُم بعد از کشتی iاُم توسط مورچه kاُم را نشان می‌دهد. پارامتر τ_{ij}مقدار فرومون پخش‌شده در مسیر i,j را نشان می‌دهد. پارامتر η_{ij} اطلاعات اکتشافی[۱۵] مسئله را نشان می‌دهد. پارامتر $\mathcal{N}_i^k$ مجموعه کشتی‌هایی را نشان می‌دهد که هنوز توسط مورچه kاُم بازدید نشده‌اند. دو پارامتر α,β وزن تأثیر دو پارامتر فرومون و اطلاعات هیوریستیک مسئله را نشان می‌دهد.

با در اختیار داشتن پارامتر $p_{i\to j}^{k}$ برای همه کشتی‌ها، می‌توان با استفاده از روند زیر راه‌حلی که هر مورچه تولید می‌کند را ایجاد کرد:

۱. ابتدا یک کشتی تصادفی انتخاب می‌شود.

۲. یکی از کشتی‌های انتخاب‌نشده، انتخاب می‌شود.

۳. اگر کشتی‌ای انتخاب‌نشده‌ای وجود داشته باشد، به مرحله ۲ مراجعه شود؛ در غیر این صورت به مرحله ٤ مراجعه شود.

٤. پایان.

در مرحله ۱ و ۲، کشتی‌ها متناسب با مقدار احتمالشان ($p_{i\to j}^{k}$) و با روش انتخاب چرخ گردان (RWS)[۱۶] انتخاب می‌شوند که در پیوست شماره ۱ توضیح داده می‌شود.

مرحله انتشار فرومون یکی از مراحل مهم در الگوریتم کلونی مورچگان است. در این مرحله به ازای هر مورچه و بر اساس مقدار برازندگی تابع هدف، فرومون منتشر می‌شود. برای انتشار فرومون از رابطه (۲۸) استفاده می‌شود. در رابطه (۲۸)، پارامتر Q یک عدد ثابت است که نمایانگر مقدار فرومونی است که هر مورچه بر روی مسیری که می‌پیماید، منتشر می‌کند. این مقدار برای هر مسئله مقدار متفاوتی دارد که باید مقدار بهینه آن محاسبه شود.

$$\tau_{ij}=\tau_{ij}+\frac{Q}{\text{مقدار برازندگی تابع هدف در راه‌حل پیشین}} \quad (۲۸)$$

مرحله تبخیر فرومون یکی دیگر از مراحل مهم الگوریتم کلونی مورچگان است. در این مرحله بایستی مقداری از فرومون‌های تولید شده روی زمین تبخیر شوند. برای این منظور از رابطه (۲۹) استفاده می‌شود. پارامتر ρ نرخ تبخیر فرومون رو نشان می‌دهد که دارای دامنه $0<\rho<1$ است.

$$\tau_{ij}=(1-\rho)\times\tau_{ij} \quad (۲۹)$$

٤-٢ روش بازیابی محلی (LR)

همان‌طور که پیش‌ازاین گفته‌شده، در روش بازیابی سراسری برنامه پهلوگیری تمام کشتی‌هایی که زمان شروع پهلوگیری‌شان پس از وقوع اختلال باشد بازیابی می‌شود. اما در روش بازیابی محلی، فقط برنامه پهلوگیری کشتی‌هایی بازیابی می‌شود که وقوع اختلال بر روی برنامه آن‌ها تأثیر گذاشته باشد. برای اولین بار در مقاله (Zeng, Yang et al. 2011) از روش بازیابی محلی برای بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه استفاده شد. نتایج عددی حاصل از مقاله زنگ و همکارانش پاسخ‌های بهتر روش بازیابی سراسری را نشان می‌دهد. در روش بازیابی محلی ابتدا یک افق زمانی (t_e) مشخص می‌شود که تا آن افق زمانی باید کشتی‌های مختل شده مدیریت شوند. سپس تعداد به‌روزرسانی حد بالا و پایین پنجره‌های زمانی و مکانی را مشخص می‌کنند (پارامتر n برای تعداد به‌روزرسانی حد بالای زمانی و پارامتر n' برای تعداد به‌روزرسانی حدهای بالا و پایین مکانی). با در اختیار داشتن این پارامترها روند زیر انجام خواهد شد:

۱) حدهای پنجره زمانی و مکانی و دو پارامتر i, i' مقداردهی اولیه می‌شوند ($i = 1, i' = 1$).

۲) برنامه اولیه کشتی‌های موجود در پنجره زمانی و مکانی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری و مدل مدیریت اختلال، بازیابی می‌شوند.

۳) اگر $i = n$ به مرحله ۵ مراجعه شود در غیر این صورت پارامتر i به‌روزرسانی ($i = i + 1$) و به مرحله ٤ مراجعه شود.

٤) پنجره زمانی به‌روزرسانی و به مرحله ۲ مراجعه شود.

۵) اگر $i' = n'$ به مرحله ۷ مراجعه شود در غیر این صورت پارامتر i' به‌روزرسانی ($i' = i' + 1$) و به مرحله ٦ مراجعه شود.

٦) پنجره مکانی به‌روزرسانی و به مرحله ۲ مراجعه شود.

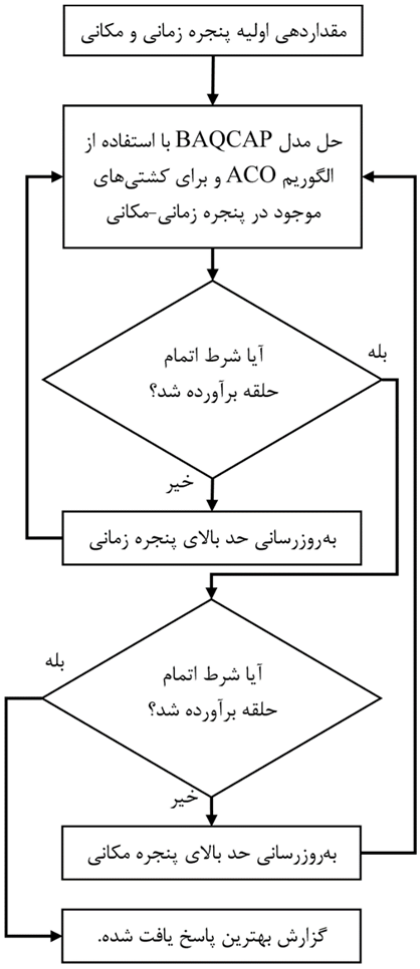
۷) پایان

در مرحله ۵، پنجره زمانی و مکانی به‌روزرسانی می‌شود. نحوه به‌روزرسانی پنجره زمانی و مکانی به‌صورت روابط (۳۰) و (۳۱) انجام می‌گیرد.

$$TimeStep = \frac{t_e - t_c}{n}, t_i^u = t_i^u + TimeStep \quad (۳۰)$$

$$SpaceStep = \frac{L - S_c}{n'}, S_{i'}^u = S_i^u + SpaceStep \quad (۳۱)$$

در روابط (۳۰) و (۳۱) پارامتر t_c زمان شروع اختلال، پارامتر S_c مکان شروع اختلال، پارامتر t_i^u حد بالای پنجره زمانی در تکرار iاُم و پارامتر $S_{i'}^u$ حد بالای پنجره مکانی در تکرار i'اُم را نشان می‌دهد. شکل ۳ نمایی از این روش را نشان می‌دهد. شرط اتمام حلقه در روش بازیابی محلی، قابل اجرا بودن برنامه اولیه است.



شکل ۳. فلوچارت روش بازیابی محلی (LR)

٤-٣ روش بازیابی محلی توسعه‌یافته (DLR)

همان‌طور که مشاهده می‌شود در روش بازیابی محلی ۳ پارامتر (t_e , n , n') نیاز به مقداردهی و تنظیم کردن دارند و پرواضح است که مقدار آن‌ها در زمان اجرا و پاسخ نهایی تأثیرگذار است. روش پیشنهادی این مقاله، روش بازیابی محلی را به‌گونه‌ای توسعه داده که نیازی به تنظیم کردن هیچ پارامتری نداشته باشد. در روش بازیابی محلی، تلاش بر این است که برنامه پهلوگاه کشتی‌هایی بازیابی شود که از پدیده اختلال متأثر شدند. بنابراین مسئله اصلی در روش بازیابی محلی، پیدا کردن کشتی‌هایی است که بیشترین تأثیر را از پدیده اختلال می‌گیرند. درروش DLR، کشتی‌هایی که متأثر از پدیده اختلال هستند در یک مجموعه به نام مجموعه کشتی‌های مختل شده[١٤] قرار می‌گیرند. در هر بار تکرار حلقه اصلی این الگوریتم، برنامه پهلوگیری و تخصیص جرثقیل‌های اسکله برای کشتی‌های موجود در مجموعه کشتی‌های مختل شده بازیابی می‌شود. اگر اجرای برنامه بازیابی شده امکان‌پذیر باشد، تکرار حلقه متوقف می‌شود؛ در غیر این صورت مجموعه کشتی‌های مختل شده به‌روزرسانی می‌شود و به مرحله بازیابی برنامه پهلوگیری کشتی‌های مختل شده مراجعه می‌شود. منظور از امکان‌پذیر بودن اجرای برنامه بازیابی شده، برنامه‌ریزی عملیات جانب دریا برای همه کشتی‌هایی است که به‌نحوی‌که از اختلال به وجود آمده تأثیر می‌پذیرند. شکل ٤، فلوچارت روش DLR را نشان می‌دهد. روند بازیابی برنامه پهلوگاه با روش DLR از قرار زیر است:

١) اطلاعات "برنامه اولیه" و "کشتی‌های مختل شده" وارد الگوریتم می‌شوند.

٢) مقداردهی اولیه پنجره مکانی-زمانی بازیابی برنامه اولیه

٣) برنامه اولیه پهلوگیری و تخصیص جرثقیل اسکله برای مجموعه کشتی‌های مختل شده، بازیابی می‌شود.

٤) اگر برنامه بازیابی شده قابل‌اجرا بود به مرحله ٦ مراجعه شود؛ در غیر این صورت به مرحله ٥ مراجعه شود.

٥) مجموعه کشتی‌های مختل شده به‌روزرسانی شود و به مرحله ٣ مراجعه شود.

٦) پایان

منظور از مقداردهی اولیه پنجره مکانی-زمانی در مرحله دوم، مشخص کردن حد بالا و پایین این پنجره است. حد پایین پنجره زمانی، برابر با زمان رسیدن کشتی مختل شده به بندر و حد بالای پنجره زمانی از رابطه (٣٢) محاسبه می‌شود. حد پایین و بالای پنجره مکانی برابر با محل شروع پهلوگیری کشتی مختل شده (x_i) و انتهای همان کشتی در پهلوگاه (B_i) است.

$$U_{tw} = L_{tw} + \sum_{t=1}^{T} r_{it} \qquad (٣٢)$$

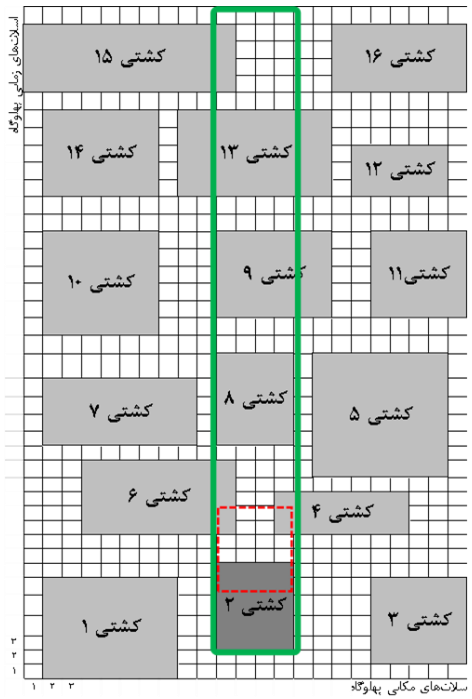
در رابطه (٣٢) پارامتر U_{tw}، حد بالای پنجره زمانی و پارامتر L_{tw}، حد پایین پنجره زمانی را نشان می‌دهد. عبارت $\sum_{t=1}^{T} r_{it}$، مدت‌زمان عملیات تخلیه/بارگیری کشتی i' را در برنامه اولیه نشان می‌دهد. کشتی i'، همان کشتی‌ای است که با پدیده اختلال مواجه شده است.

در مرحله سوم روش DLR، برنامه عملیات جانب دریا برای مجموعه کشتی‌های مختل شده بازیابی می‌شود. برای بازیابی برنامه این کشتی‌ها، مدل ریاضی RBAQCAP با استفاده از الگوریتم ACO حل می‌شود.

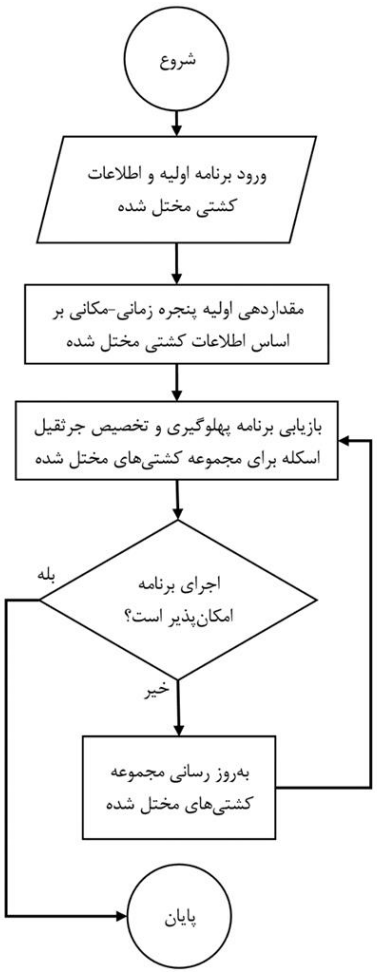
در مرحله پنجم مجموعه کشتی‌های مختل شده به‌روزرسانی می‌شود. برای به‌روزرسانی مجموعه کشتی‌های مختل شده، نیاز است تا سه مجموعه به‌صورت زیر تعریف شوند:

- مجموعه کشتی مختل شده: کشتی‌هایی که به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم متأثر از اختلال به وجود آمده، هستند.
- مجموعه کشتی‌های مستعد اختلال در محور زمان: مجموعه کشتی‌هایی هستند که پس از کشتی مختل شده اولیه پهلوگیری می‌کنند و بین دو حد پایین و بالای پنجره مکانی قرار می‌گیرند. در شکل ٤، کشتی‌هایی که در کادر سبزرنگ قرار گرفتند (کشتی‌های ٤، ٦، ٨، ٩، ١٣ و ١٥) مستعد اختلال در محور زمان هستند.

● مجموعه کشتی‌های مستعد اختلال: دیگر کشتی‌هایی که در دو مجموعه بالا قرار نگرفتند و هنوز پهلوگیری نکردند، عضو این مجموعه هستند. در شکل ٤، کشتی‌هایی که خارج از کادر سبزرنگ هستند (کشتی‌های ٥، ٧، ١٠، ١١، ١٢، ١٤ و ١٦) عضو این مجموعه هستند. دقت شود که دو کشتی شماره ١ و ٣ عضو هیچ مجموعه‌ای نیستند؛ چراکه روند پهلوگیری آن‌ها پیش از شروع اختلال انجام‌گرفته و دیگر متأثر از پدیده اختلال نیستند.



شکل ٤. مجموعه کشتی‌های مستعد اختلال در برنامه اولیه پهلوگاه



شکل ٥. فلوچارت روش بازیابی محلی توسعه یافته (DLR)

برای به‌روزرسانی مجموعه کشتی‌های مختل شده، ابتدا به مجموعه کشتی‌های مستعد اختلال در محور زمان مراجعه می‌شود. کشتی‌های این مجموعه را بر اساس زمان پهلوگیری‌شان مرتب کرده و اولین کشتی از این مجموعه انتخاب می‌شود و به مجموعه کشتی‌های مختل شده اضافه می‌شود. اگر مجموعه کشتی‌های مستعد اختلال در محور زمان خالی باشد، به مجموعه کشتی‌های مستعد اختلال مراجعه می‌شود و کشتی‌ها را بر اساس فاصله از کشتی مختل شده اولیه مرتب می‌شود و اولین کشتی از این مجموعه را به مجموعه کشتی‌های مختل شده اضافه می‌شود. در جدول ٥ دو مجموعه کشتی‌های مستعد اختلال و کشتی‌های مستعد اختلال در محور زمان مشاهده می‌شود.

جدول ۵. مجموعه‌های کشتی‌های مستعد اختلال

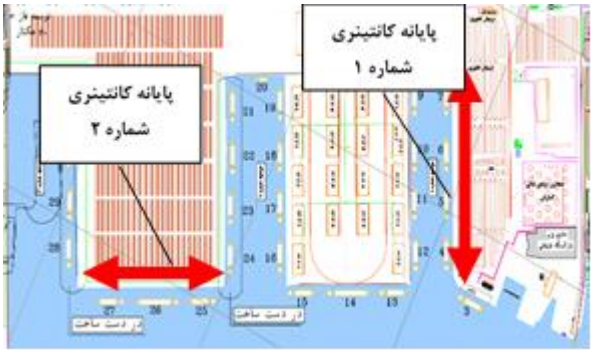
مجموعه کشتی‌های مستعد اختلال در محور زمان			مجموعه کشتی‌های مستعد اختلال		
ترتیب	زمان پهلوگیری	کشتی	ترتیب	فاصله از کشتی مختل شده اولیه	کشتی
۱	۱۰	٤	۱	۱	۵
۲	۱۰	٦	۲	۱	۷
۳	۱٦	۸	۳	۳	۱۰
٤	۲۳	۹	٤	٤	۱۱
۵	۳۰	۱۳	۵	۳	۱۲
٦	۳٦	۱۵	٦	۳	۱٤
			۷	۲	۱٦

درروش بازیابی محلی توسعه‌یافته، برخلاف روش بازیابی محلی در مقاله زِنگ و همکارانش، نیازی به تنظیم هیچ پارامتری نیست و با همان اطلاعات برنامه اولیه و کشتی مختل شده می‌توان برنامه اولیه را به‌صورت محلی بازیابی نمود.

٤-٤ داده‌های مورد استفاده

این مقاله برای برنامه‌ریزی اولیه پهلوگاه و ارزیابی دو روش بازیابی محلی و سراسری، از داده‌های ورود و خروج کشتی‌ها در بندر شهید رجایی استفاده می‌کند. بندر شهید رجایی دو پایانه کانتینری دارد که در جدول ٦ اطلاعات این دو پایانه کانتینری گزارش می‌شود. شکل ٦ جانمایی پایانه‌های کانتینری در بندر شهید رجایی را نمایش می‌دهد.

این مقاله برای ایجاد تنوع در مجموعه داده‌ها و دقت بیشتر در نتایج به‌دست‌آمده، از داده‌های هر دو پایانه استفاده می‌کند. ازآنجاکه دسترسی به برخی از داده‌ها امکان‌پذیر نبود، مقدار آن‌ها مطابق با دیگر مقالات فرض شدند. این داده‌ها در جدول ۷ گزارش شدند.



شکل ٦. جانمایی پایانه‌های کانتینری در بندر شهید رجایی

جدول ٦. اطلاعات پایانه‌های کانتینری بندر شهید رجایی

پایانه‌های کانتینری	طول پهلوگاه (متر)	تعداد جرثقیل اسکله
پایانه شماره ۱	۱۱٦۰	۱۰
پایانه شماره ۲	۱۱۱۰	۸

جدول ۷. داده‌های فرض شده

داده	داده تولیدشده
حداکثر تعداد جرثقیل اسکله	متناسب با طول کشتی، تعداد حداکثر جرثقیل اسکله محاسبه‌شده است. به ازای هر ۵۰ متر، یک جرثقیل اسکله می‌تواند پهلوگیری کند. $q_i^{max} = \frac{L}{50}$
حداقل تعداد جرثقیل اسکله	حداقل تعداد جرثقیل اسکله برای همه کشتی‌ها برابر با ۱ در نظر گرفته‌شده است. $q_i^{min} = 1$
فاصله ایمن بین کشتی‌ها	مقدار فاصله ایمن بین کشتی‌ها برابر با ۲۰ متر در نظر گرفته‌شده است.
محل بهینه پهلوگیری کشتی	محل بهینه کشتی با استفاده از توزیع یکنواخت گسسته تولیدشده است. $b_i = U(1, L)$
موعد ترک کشتی از بندر	موعد ترک کشتی بر اساس زمان تخمینی ورود کشتی و حداکثر تعداد جرثقیل اسکله محاسبه‌شده است. با فرض اینکه به تعداد حداکثر جرثقیل اسکله به کشتی **i** تخصیص داده شود، موعد مقرر ترک کشتی از بندر محاسبه می‌شود. $d_i = a_i + \left\lceil \frac{C_i}{q_i^{max}} \right\rceil$
C_{1i}	$\frac{100 l_i}{230}$ $(US\$)$
C_{2i}	$\frac{20000 l_i}{230}$ $(US\$)$
C_3	$200\ US\$$
سرعت عملیات تخلیه/بارگیری کانتینرها	$30 \frac{Movement}{Hour}$

٤-٥ استخراج داده از بانک داده‌ها

پیچیدگی حل مدل BAQCAP رابطه مستقیمی با تعداد کشتی-ها برای برنامه‌ریزی دارد؛ هرچه تعداد کشتی‌ها بیشتر باشد، پیچیدگی حل مدل بیشتر می‌شود. درنتیجه داده‌های نمونه بر اساس تعداد کشتی‌ها (۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵، ٤٠) دسته‌بندی می‌شوند. از طرف دیگر برای افزایش تنوع در داده‌ها، به ازای هر تعداد کشتی، ۵ مجموعه داده استخراج و بررسی می‌شود. داده‌های بندر شهید رجایی از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۱ در اختیار نویسندگان این مقاله قرار گرفت و از بین آن‌ها، داده‌هایی انتخاب شد که بیشترین پیچیدگی را در حل مدل‌های ریاضی داشته باشند؛ به عبارت بهتر سعی بر آن بوده است که مجموعه کشتی‌هایی متوالی‌ای انتخاب شوند که بیشترین تعداد کانتینر برای تخلیه/بارگیری داشته باشند.

۵. نتایج و تفسیر آن‌ها

۵-۱ کدبندی و کدگشایی راه‌حل

پاسخ نهایی مدل به‌صورت یک رشته از اعداد جایگشتی کدبندی می‌شود که ترتیب برنامه‌ریزی کشتی‌ها را نشان می‌دهد. طول این رشته، برابر با تعداد کشتی‌هایی است که قرار است برنامه‌ریزی شوند. به‌عنوان‌مثال در شکل ۷، هفت کشتی وجود دارند که باید برنامه‌ریزی شوند. درنتیجه یک راه‌حل برای برنامه‌ریزی عملیات جانب دریا برای هفت کشتی می‌تواند رشته‌ای مشابه با شکل ۷ باشد. شکل ۷ رشته از اعداد را نشان می‌دهد که جایگشت عدد ۱ تا ۷ است. کدگشایی این رشته از اعداد، ترتیب برنامه‌ریزی کشتی‌ها است. مطابق با راه‌حل مشاهده‌شده در شکل ۷، ابتدا کشتی شماره ٤ برنامه‌ریزی می‌شود، سپس کشتی شماره ۷ و ۲

و ۱ و ٦ و ۳ و درنهایت کشتی شماره ۵ برنامه‌ریزی می‌شود. برنامه‌ریزی هر کشتی به معنی مشخص شدن زمان و مکان پهلوگیری و هم‌چنین تعداد جرثقیل‌های تخصیص داده‌شده در هر اسلات زمانی است.

۴	۷	۲	۱	۶	۳	۵

شکل ۷. کدبندی راه‌حل در الگوریتم ACO

۵-۲ حل مدل BAQCAP

مدل BAQCAP به دنبال بهترین ترتیب کشتی‌ها برای برنامه-ریزی است. برای اعتبارسنجی الگوریتم ACO پیشنهادی و کد-های نوشته‌شده، نتایج الگوریتم ACO با روش برنامه‌ریزی بر اساس زمان ورود (FCFS)[۱۷] مقایسه می‌شود. در این روش کشتی‌ها بر اساس زمان ورودشان برنامه‌ریزی می‌شوند؛ به‌عبارت بهتر، هر کشتی که زودتر وارد بندر شود، زودتر پهلوگیری می-کند.

تمام کدهای نوشته‌شده برای حل مدل BAQCAP، در نرم‌افزار MatLab R2019b نوشته‌شده است. هم‌چنین برای تنظیم پارامترهای الگوریتم ACO، از نرم‌افزار Minitab استفاده‌شد. برای اجرای کدها از یک سیستم رایانه شخصی استفاده‌شده است که مشخصات آن به شرح زیر است:

- سیستم‌عامل: $Windows\ 10-64\ bit$
- واحد پردازنده مرکزی (CPU)

$Core^{TM}\ i7-4790,\ 3/60\ GHz$

- حافظه دسترسی تصادفی (RAM): $16\ GB$

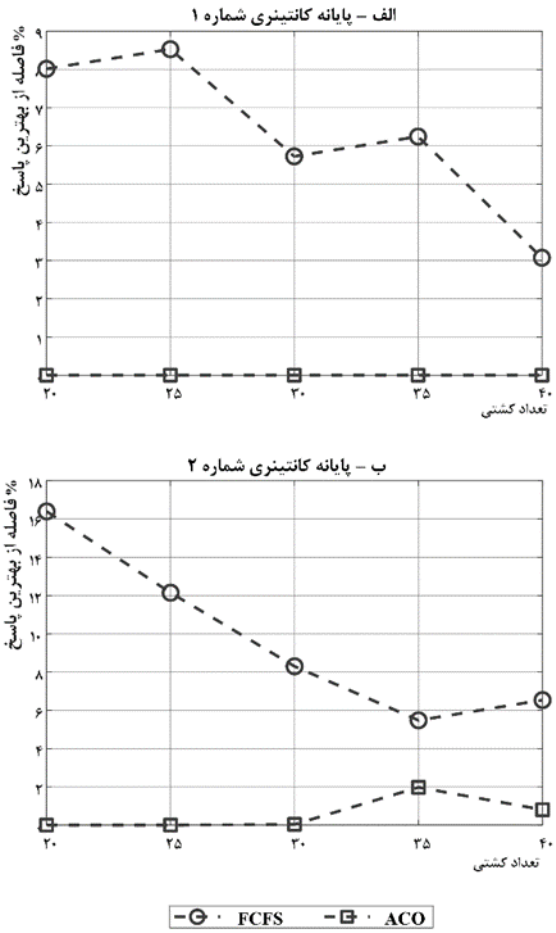
ازآنجاکه حل مدل BAQCAP با مجموعه داده‌های متنوعی انجام شده، برای مقایسه نتایج الگوریتم ACO و روش FCFS، ابتدا بایستی نتایج حل مدل را نرمال‌سازی کرد. نرمال‌سازی نتایج در این مقاله با استفاده از رابطه شماره (۳۳) انجام می‌گیرد. در رابطه شماره (۳۳) ابتدا بهترین پاسخ را از میان دو روش FCFS و الگوریتم ACO محاسبه می‌شود سپس با استفاده از رابطه (۳۳) درصد فاصله از بهترین پاسخ محاسبه می‌گردد.

$$\text{فاصله از بهترین پاسخ} = \frac{\text{پاسخ الگوریتم} - \text{بهترین پاسخ}}{\text{بهترین پاسخ}} \times 100 \quad (۳۳)$$

نتایج خام حل مدل BAQCAP با کمک الگوریتم ACO در پیوست شماره ۲ گزارش می‌شود. جدول ۸، درصد فاصله از بهترین پاسخ را بین دو روش FCFS و الگوریتم ACO نشان می‌دهد. برای محاسبه اعداد جدول ۸، میانگین درصد فاصله از بهترین پاسخ در بین ۵ مجموعه داده محاسبه گردیده و به‌ازای تعداد کشتی‌ها گزارش گردیده است. به‌عنوان‌مثال به‌ازای ۲۰ کشتی، در هر پایانه ۵ مجموعه داده مورد استفاده قرارگرفته است، عدد نشان داده‌شده در جدول ۸، میانگین این ۵ مجموعه عدد را نشان می‌دهد که بهترین ملاک برای مقایسه نتایج الگوریتم ACO و روش FCFS می‌باشد. هرچه اعداد جدول کوچک‌تر باشند، به این معنی است که به پاسخ بهینه نزدیک‌تر می‌باشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود تقریباً در تمام موارد الگوریتم ACO به پاسخ بهینه یافت شده بین دو روش FCFS و SCO نزدیک‌تر است، بنابراین الگوریتم پیشنهادی و کدهای نوشته‌شده اعتبار لازم را دارند.

جدول ۸ اعتبارسنجی الگوریتم ACO

تعداد کشتی‌ها	پایانه شماره ۱		پایانه شماره ۱	
	الگوریتم ACO	روش FCFS	الگوریتم ACO	روش FCFS
۲۰	۰/۰۰٪	۸/۰۲٪	۰/۰۰٪	۱۶/۴۰٪
۲۵	۰/۰۰٪	۸/۵۳٪	۰/۰۰٪	۱۲/۱۵٪
۳۰	۰/۰۰٪	۵/۷۳٪	۰/۰۴٪	۸/۳۰٪
۳۵	۰/۰۰٪	۶/۲۵٪	۱/۹۷٪	۵/۴۸٪
۴۰	۰/۰۰٪	۳/۰۷٪	۰/۸۰٪	۶/۵۴٪



شکل ۸. مقایسه دو روش FCFS و الگوریتم ACO

شکل ۸، اعداد جدول ۸ را در قالب نمودار نشان می‌دهد. محور افقی این نمودارها، تعداد کشتی‌ها و محور عمودی، فاصله از بهترین پاسخ را بر اساس درصد نشان می‌دهد؛ هر چه اعداد این نمودار پایین‌تر باشد، یعنی به پاسخ بهینه یافت شده نزدیک‌تر است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ب پیچیده‌تر شدن مسئله (افزایش تعداد کشتی‌ها) الگوریتم ACO عملکرد ضعیف‌تری پیدا می‌کند. ازآنجاکه در پایانه کانتینری شماره ۲ تعداد جرثقیل‌های اسکله کم‌تر می‌باشد، حل مسئله BAQCAP پیچیده‌تر خواهد بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در پایانه کانتینری شماره ۲، فاصله بین دو روش FCFS و الگوریتم ACO کم‌تر می‌شود؛ یعنی عملکرد الگوریتم ACO ضعیف‌تر می‌شود. اما در تعداد کشتی‌های کم‌تر، نتایج الگوریتم ACO قابل قبول می‌باشد.

۵-۳ بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه

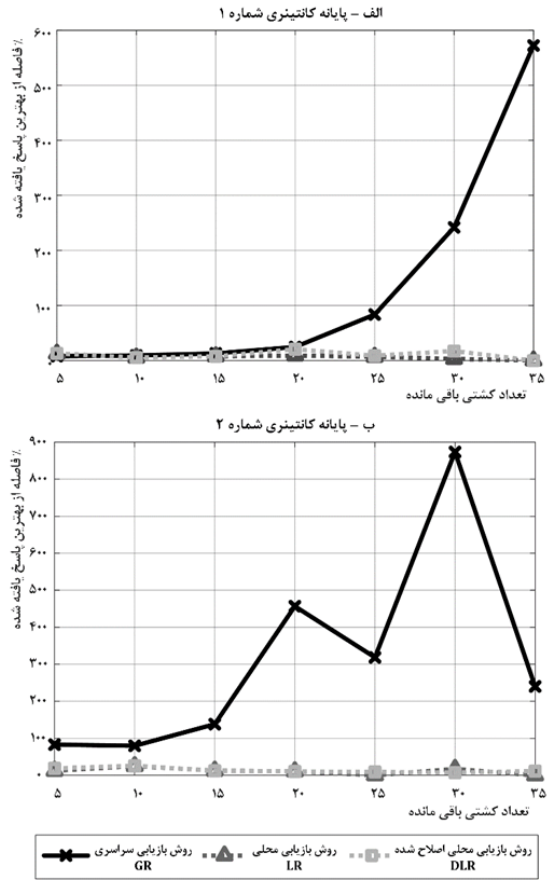
مدیریت اختلال، بازیابی برنامه کشتی‌هایی است که در برنامه اولیه پس از وقوع اختلال، پهلوگیری می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که کم‌ترین هزینه و جریمه به بندر تحمیل شود. همان‌طور که پیش‌ازاین گفته شد، پیچیدگی حل مسئله برنامه‌ریزی پهلوگاه رابطه مستقیمی با تعداد کشتی‌ها دارد؛ هرچه تعداد کشتی‌های باقی‌مانده پس از وقوع اختلال بیشتر باشد، بازیابی برنامه اولیه سخت‌تر می‌شود. به همین منظور، به‌گونه‌ای اختلال ساختگی در برنامه اولیه ایجاد می‌شود که بتوان آن‌ها را بر اساس تعداد کشتی‌های باقی‌مانده پس از وقوع اختلال دسته‌بندی کرد. در پیوست شماره ۳، نتایج خام به‌دست‌آمده از حل مدل مدیریت اختلال با روش‌های GR، LR و DLR گزارش می‌شود.

برای ایجاد اختلال ساختگی در برنامه اولیه، ابتدا کشتی‌ها را بر اساس زمان پهلوگیری‌شان مرتب کرده و سپس کشتی‌های مضرب ۵ به‌عنوان کشتی‌های دارای اختلال انتخاب می‌شوند (کشتی‌های پنجم، دهم، پانزدهم و ...). هر بار زمان ورود یکی از این کشتی‌های انتخاب شده به مدت ۱۲ ساعت پس از شروع پهلوگیری‌شان تأخیر داده می‌شوند تا یک اختلال در برنامه اولیه ایجاد شود (به‌عنوان‌مثال یک‌بار کشتی پنجم را در برنامه اولیه اختلال می‌دهیم، یک‌بار کشتی دهم، یک‌بار کشتی پانزدهم و ...). حال برنامه‌های اولیه را بر اساس تعداد کشتی‌ها باقی‌مانده پس از وقوع اختلال دسته‌بندی و هرکدام با استفاده از مدل مدیریت اختلال RBQCAP و روش‌های GR، LR و DLR حل می‌شوند.

در دو جدول ۹ و ۱۰، نتایج سه روش بازیابی برای هر دو پایانه کانتینری بندر شهید رجایی مقایسه شدند. ستون اول این دو جدول، تعداد کشتی‌های باقی‌مانده پس از وقوع اختلال در برنامه اولیه پهلوگاه را نشان می‌دهد. اعداد این دو جدول، "درصد فاصله از بهترین پاسخ پیدا شده "بین سه روش بازیابی را گزارش می‌دهد که با استفاده از رابطه (۳۳) محاسبه می‌گردد. اعداد جدول‌های ۸ و ۹ میانگین درصد فاصله از بهترین پاسخ یافت

شده بین سه روش بازیابی را به‌ازای تعداد کشتی‌های باقی‌مانده پس از وقوع اختلال را نشان می‌دهد (به‌عنوان‌مثال عدد ۸٪ در ردیف اول جدول ۸ که برای روش GR و به‌ازای ۵ کشتی باقی‌مانده نوشته‌شده، میانگین درصد فاصله از بهترین پاسخ در بین همه برنامه‌های اولیه‌ای که تنها ۵ کشتی پس از وقوع اختلال در آن‌ها قرار داشته است).

در شکل‌های ۹ و ۱۰ سه روش بازیابی در قالب نمودار با یکدیگر مقایسه می‌شوند. محور افقی این نمودارها تعداد کشتی‌های باقی-مانده پس از وقوع اختلال را نشان می‌دهد. محور عمودی این نمودارها، "درصد فاصله از بهترین پاسخ یافت شده" بین سه روش GR، LR و DLR را نشان می‌دهد.



شکل ۹. مقایسه پاسخ روش‌های بازیابی

در شکل ۹ پاسخ‌های سه روش بازیابی مقایسه شدند. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، هر چه تعداد کشتی‌های باقی-مانده در برنامه اولیه پس از وقوع اختلال بیشتر می‌شود، روش GR از پاسخ بهینه بیشتر فاصله می‌گیرد. دو روش LR و DLR پاسخ‌های نزدیک به‌هم دارند. با دقت به اعداد محاسبه‌شده در جدول ۹، مشاهده می‌شود که در پایانه کانتینری شماره ۱ اگر تعداد کشتی‌های باقی‌مانده در برنامه اولیه پس از وقوع اختلال کم باشد (کم‌تر از ۱۵ عدد)، پاسخ‌های روش GR به پاسخ‌های دو روش دیگر نزدیک است. اما در پایانه کانتینری شماره ۲ که کشتی‌های اقیانوس‌پیما و با تعداد بیشتر کانتینر پهلوگیری می‌کنند و تعداد جرثقیل‌های اسکله هم کم‌تر می‌باشد، این نتیجه‌گیری صادق نیست. به‌عبارت بهتر در پایانه کانتینری شماره ۲ که حل مسئله سخت‌تر می‌باشد، پاسخ‌های دو روش LR و DLR بهتر از روش GR می‌باشد.

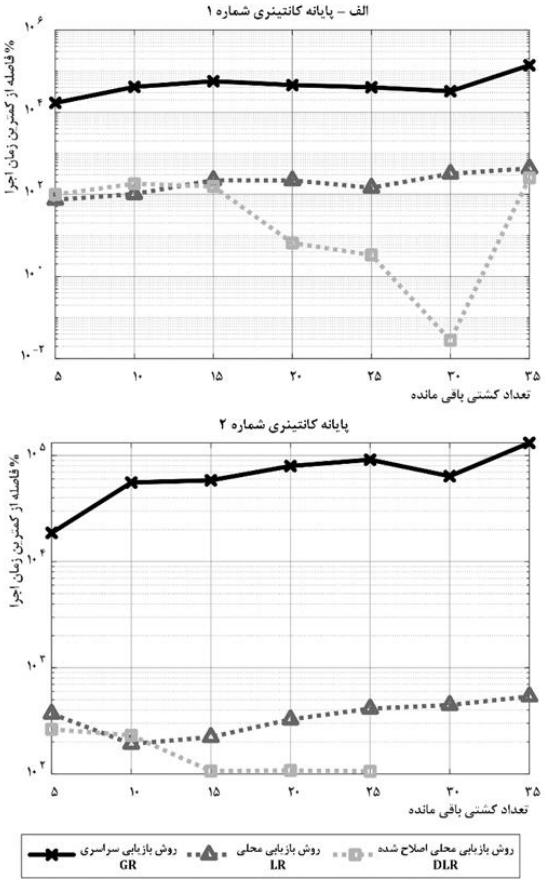
جدول ۹. مقایسه پاسخ نهایی روش‌های بازیابی

تعداد کشتی‌های باقی‌مانده	پایانه کانتینری شماره ۱			پایانه کانتینری شماره ۲		
	GR	LR	DLR	GR	LR	DLR
۵	۸/۰۰٪	۱۲/۸۶٪	۱۳/۰۸٪	۸۲/۸۸٪	۱۲/۳۳٪	۱۸/۷۸٪
۱۰	۹/۴۴٪	۵/۵۷٪	۵/۵۷٪	۷۹/۷۰٪	۲۴/۸۶٪	۲۵/۷۴٪
۱۵	۱۳/۰۱٪	۷/۸۵٪	۷/۷۶٪	۱۳۸/۲۱٪	۱۲/۵۰٪	۱۲/۳۶٪
۲۰	۲۴/۷۶٪	۹/۲۷٪	۲۰/۶۸٪	۴۵۶/۷۴٪	۱۰/۸۱٪	۱۰/۳۲٪
۲۵	۸۳/۶۶٪	۶/۹۲٪	۸/۸۷٪	۳۱۸/۵۸٪	۰/۱۹٪	۹/۰۰٪
۳۰	۲۴۱/۹۵٪	۳/۱۸٪	۱۷/۴۱٪	۸۷۳/۴۵٪	۱۷/۲۹٪	۷/۱۶٪
۳۵	۵۷۲/۲۱٪	۰/۳۸٪	۰/۰۲٪	۲۴۰/۰۹٪	۰/۰۰٪	۱۱/۳۷٪
میانگین	۱۳۶/۱۵٪	۶/۵۸٪	۱۰/۴۹٪	۳۱۲/۸۱٪	۱۱/۱۴٪	۱۳/۵۳٪

جدول ۱۰. مقایسه زمان اجرای روش‌های بازیابی

تعداد کشتی‌های باقی‌مانده	پایانه کانتینری شماره ۱			پایانه کانتینری شماره ۲		
	GR	LR	DLR	GR	LR	DLR
۵	۱۶۸۷۶٪	۷۳٪	۹۹٪	۱۸۶۷۳٪	۳۶۹٪	۲۶۳٪
۱۰	۴۱۳۹۹٪	۱۰۲٪	۱۸۱٪	۵۵۶۸۱٪	۱۹۲٪	۲۳۱٪
۱۵	۵۶۸۴۵٪	۲۲۲٪	۱۵۶٪	۵۸۴۴۲٪	۲۲۲٪	۱۰۶٪
۲۰	۴۵۹۷۷٪	۲۱۸٪	۷٪	۷۹۶۲۸٪	۳۲۶٪	۱۰۸٪
۲۵	۴۰۵۲۹٪	۱۴۵٪	۳٪	۹۱۳۷۲٪	۴۱۲٪	۱۰۶٪
۳۰	۳۲۴۱۶٪	۳۱۷٪	۰٪	۶۳۸۹۰٪	۴۴۵٪	۰٪
۳۵	۱۳۸۹۸۹٪	۴۲۹٪	۲۵۲٪	۱۳۱۵۵۷٪	۵۳۶٪	۰٪
میانگین	۵۳۲۹۰/۲۲٪	۲۱۵/۰۵٪	۹۹/۶۳٪	۷۱۳۲۰/۴۳٪	۳۵۷/۴۵٪	۱۱۶/۲۴٪

در شکل ۱۰ سرعت رسیدن به پاسخ نهایی سه روش بازیابی مقایسه شدند. با توجه به فاصله بسیار زیاد روش GR از دو روش LR و DLR، محور عمودی نمودارهای شکل ۹ با مقیاس لگاریتمی ترسیم‌شده‌اند تا بهتر بتوان روش‌های بازیابی را مقایسه کرد. با دقت به نمودارهای شکل ۹ مشاهده می‌شود که سرعت روش‌های بازیابی محلی نسبت به روش بازیابی سراسری بیشتر است. بین دو روش LR و DLR، روش بازیابی توسعه‌یافته در این مقاله با سرعت بیشتری به پاسخ بهینه می‌رسد. شایان‌ذکر است که نمودارهای لگاریتمی توانایی نشان دادن مقدار صفر مطلق را ندارند (مقدار صفر مطلق عدد $-\infty$ را در نمودارهای لگاریتمی نشان می‌دهد). بنابراین در شکل ۹-نمودار ب، درصد فاصله از کم‌ترین زمان اجرا در روش DLR و به‌ازای کشتی‌های باقی‌مانده ۳۰ و ۳۵ عدد ۹ حذف شده است. با دقت به اعداد محاسبه‌شده در جدول ۱۰، مشاهده می‌شود که درصد فاصله از کم‌ترین زمان اجرای روش DLR به‌ازای ۳۰ و ۳۵ کشتی باقی‌مانده، برابر با صفر است.



شکل ۱۰. مقایسه زمان اجرای روش‌های بازیابی

٦. نتیجه‌گیری

برنامه‌ریزی پهلوگاه یکی از مسائل مدیریت بندر محسوب می‌شود که پاسخ بهینه این مسئله می‌تواند بر روی هزینه‌های بندر تأثیرگذار باشد. این مقاله، برنامه‌ریزی پهلوگاه در شرایط عادی و بازیابی آن در شرایط وقوع اختلال را بررسی می‌کند. هدف اصلی این مقاله معرفی یک روش بازیابی برای مدیریت اختلال برنامه پهلوگاه است که نیاز به تنظیم پارامتر نداشته باشد. در ین مقاله از الگوریتم ACO برای حل مدل‌های ریاضی استفاده شد. نتایج عددی این مقاله نشان می‌دهد که روش GR عملکرد مناسبی برای بازیابی برنامه پهلوگاه ندارد. در مقابل، دو روش بازیابی محلی (DLR و LR) عملکرد بسیار مناسبی در بازیابی برنامه اولیه پهلوگاه دارند؛ خصوصاً اگر اختلال در ابتدای برنامه رخ دهد و تعداد کشتی‌های باقی‌مانده در برنامه اولیه پس از وقوع اختلال زیاد باشد. پاسخ‌های روش DLR تقریباً مشابه با روش LR است (روش DLR به‌صورت میانگین ۲ الی ٤ درصد از پاسخ‌های بهینه فاصله بیشتری دارد) اما با سرعت بسیار بیشتری نسبت به دو روش LR و GR به پاسخ بهینه می‌رسد (به‌صورت میانگین ۲ الی ۵ برابر سریع‌تر به پاسخ بهینه می‌رسد). در مطالعات آینده می‌توان با تمرکز بر منطق حاکم بر روش‌های بازیابی محلی، صرفاً کشتی‌هایی که از پدیده اختلال متأثر می‌شوند را سریع‌تر یافت. در مدل‌های ریاضی این مقاله از محدودیت‌ها فیزیکی پهلوگیری کشتی‌ها چشم‌پوشی شده است؛ در مطالعات آینده می‌توان محدودیت‌های فیزیکی پهلوگیری کشتی‌ها را در نظر گرفت.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Berth Allocation Problem (BAP)
2. Quay Crane Assignment Problem (QCAP)
3. Quay Crane Scheduling Problem (QCSP)
4. Integrates Models
5. Regular uncertainty
6. Disruption
7. Disruption Management
8. Global Recovery (GR)
9. Local Recovery (LR)
10. Berth Allocation and Quay Crane Assignment Problem (BAQCAP)
11. Recovery of Berth Allocation and Quay Crane Assignment in the original Plan (RBAQCAP)
12. Developed Local Recovery (DLR)
13. Ant Colony Optimization algorithm (ACO)
14. Disrupted Vessel Set (DVS)
15. Heuristic Information
16. Roulette Wheel Selection (RWS)
17. First Come First Service (FCFS)

پیوست ۱) روش انتخاب چرخ گردان (RWS)

در روش انتخاب چرخ گردن ابتدا باید احتمال انتخاب شدن هرکدام از اعضای جمعیت محاسبه شود. برای محاسبه احتمال هرکدام از اعضای جمعیت از روش بولتزمان استفاده می‌شود.

برای محاسبه احتمال در روش بولتزمان از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$p_i = \frac{e^{\text{مقدار برازندگی عضو موردنظر}}}{\sum e^{\text{مقدار برازندگی هر عضو جامعه}}}$$

حال برای انتخاب یک عضو از جمعیت، روند زیر اجرا می‌شود:

۱) جمع تجمعی احتمال انتخاب شدن همه اعضا محاسبه می‌شود. ($C_i = \sum_1^i p_i$)

۲) یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱، با کمک توزیع احتمالی یکنواخت تولید می‌شود. ($r = U(0,1)$)

۳) اولین عضوی که در شرط $r \leq C_i$ صدق کند، به‌عنوان عضو منتخب انتخاب می‌شود.

عضو خروجی = $\min\{i \mid r \leq C_i\}$

پیوست ۲ و ۳) نتایج خام حل مدل‌های BAQCAP و مدیریت اختلال

با توجه به تعداد زیاد ردیف‌های نتایج خام، در قالب یک فایل اکسل ضمیمه مقاله گردیده است. شایان ذکر است که واحد زمان اجرای الگوریتم‌ها، بر حسب ثانیه می‌باشد.

۸. مراجع

– حسن‌نایبی, ع., س. ح. ذگردی, م. امین ناصری و م. یقینی (۲۰۱۸). "بهینه سازی استراتژی‌های مدیریت اختلال در خطوط راه آهن شهری با استفاده از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر." فصلنامه مهندسی حمل و نقل ۹(۳): ۴۵۱-۴۷۱.

– Bierwirth, C. and F. Meisel (2010). "A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals." European Journal of Operational Research 202(3): 615-627.

– Bierwirth, C. and F. Meisel (2015). "A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals." European Journal of Operational Research 244(3): 675-689.

– Carlo, H. J., I. F. Vis and K. J. Roodbergen (2015). "Seaside operations in container terminals: literature overview, trends, and research directions." Flexible Services and Manufacturing Journal 27(2): 224-262.

– Iris, Ç. and J. S. L. Lam (2019). "Recoverable robustness in weekly berth and quay crane planning." Transportation Research Part B: Methodological 122: 365-389.

– Iris, Ç., D. Pacino and S. Ropke (2017). "Improved formulations and an adaptive large neighborhood search heuristic for the integrated berth allocation and quay crane assignment problem." Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 105: 123-147.

– Kim, A., H.-J. Park, J.-H. Park and S.-W. Cho (2021). "Rescheduling Strategy for Berth Planning in Container Terminals: An Empirical Study from Korea." Journal of Marine Science and Engineering 9(5): 527.

– Lee, C.-Y. and D.-P. Song (2017). "Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities." Transportation Research Part B: Methodological 95: 442-474.

– Li, M. Z., J. G. Jin and C. X. Lu (2015). "Real-time disruption recovery for integrated berth allocation and crane assignment in container terminals." Transportation Research Record 2479(1): 49-59.

– Li, Q., S. Tong, C. Yang and N. Wang (2009). Optimization of operation scheme of container terminal based on disruption management. International Conference on Transportation Engineering 2009.

– Schepler, X., N. Absi, D. Feillet and E. Sanlaville (2019). "The stochastic discrete berth allocation problem." EURO Journal on Transportation and Logistics 8(4): 363-396.

– Xiang, X., C. Liu and L. Miao (2018). "Reactive strategy for discrete berth allocation and quay crane assignment problems under uncertainty." Computers & Industrial Engineering 126: 196-216.

– Yan, S., C.-C. Lu, J.-H. Hsieh and H.-C. Lin (2019). "A dynamic and flexible berth allocation model with stochastic vessel arrival times." Networks and Spatial Economics 19(3): 903-927.

– Zeng, Q., Z. Yang and X. Hu (2011). "Disruption recovery model for berth and quay crane scheduling in container terminals." Engineering Optimization 43(9): 967-983.

– Zhang, Q., Q. Zeng and H. Yang (2016). "A lexicographic optimization approach for berth schedule recovery problem in container terminals." Transport 31(1): 76-83.

– Zhen, L., L. H. Lee and E. P. Chew (2011). "A decision model for berth allocation under uncertainty." European Journal of Operational Research 212(1): 54-68.

– Zhou, P.-f. and H.-g. Kang (2008). "Study on berth and quay-crane allocation under stochastic environments in container terminal." Systems Engineering-Theory & Practice 28(1): 161-169.

– Liu, C., X. Xiang and L. Zheng (2020). "A two-stage robust optimization approach for the berth allocation problem under uncertainty." Flexible Services and Manufacturing Journal 32(2): 425-452.

– Liu, C., L. Zheng and C. Zhang (2016). "Behavior perception-based disruption models for berth allocation and quay crane assignment problems." Computers & Industrial Engineering 97: 258-275.

– Lu, Z.-q. and L.-f. Xi (2010). "A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time." European Journal of Operational Research 207(3): 1327-1340.

– Lv, X., J. G. Jin and H. Hu (2020). "Berth allocation recovery for container transshipment terminals." Maritime Policy & Management: 1-17.

– Lv, X., J. G. Jin and H. Hu (2020). "Berth allocation recovery for container transshipment terminals." Maritime Policy & Management 47(4): 558-574.

– Rodrigues, F. and A. Agra (2021). "An exact robust approach for the integrated berth allocation and quay crane scheduling problem under uncertain arrival times." European Journal of Operational Research.

– Rodriguez-Molins, M., M. Salido and F. Barber (2014). "Robust scheduling for berth allocation and quay crane assignment problem." Mathematical Problems in Engineering 2014.

توسعه روش بازیابی محلی جهت مدیریت اختلال برنامه پهلوگاه

علی امیدوارپناه احمدآبادی، درجه کارشناسی مهندس عمران را در سال ۱۳۹۵ از موسسه آموزش عالی آپادنا و درجه کارشناسی ارشد برنامه‌ریزی حمل‌ونقل را از دانشگاه علم‌وصنعت اخذ نمود. در حال حاضر در صنعت حمل‌ونقل مشغول به پژوهش و فعالیت علمی است. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان حمل‌ونقل دریایی، لجستیک و حمل‌ونقل کالا، کاربرد الگوریتم‌های ابتکار/فراابتکاری در حمل‌ونقل، هوش مصنوعی و داده کاوی است.

عبدالرضا شیخ‌الاسلامی کندلوس درجه کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی عمران را به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۷۲، ۱۳۷٤ و ۱۳۸۵ از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان حمل‌ونقل دریایی، حمل‌ونقل ریلی، حمل‌ونقل هوایی، ایمنی در حمل‌ونقل، لجستیک و زنجیره تامین است. ایشان در حال حاضر عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران دنشگاه علم-وصنعت هستند. در سابقه اجرایی ایشان استانداری هرمزگان، ریاست دفتر رئیس جمهور، وزارت تعاون کار رفاه و امور اجتماعی وجود دارد.